

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

PROTOTYP VSTŘIKOVACÍHO LISU

INJECTION MOULDING MACHINE PROTOTYPE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Adam Cikryt

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jakub Arm, Ph.D.

BRNO 2021

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Adam Cikryt

ID: 211134

Ročník: 3

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Prototyp vstřikovacího lisu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Úkolem je navrhnout a realizovat prototyp vstřikovacího lisu provozovaného v laboratorních podmínkách. Práce zahrnuje jak vytvoření mechanického konceptu tak elektrifikaci pomocí vhodných komponentů, dále vytvoření a implementaci softwarového vybavení.

- 1) Definujte požadavky na prototyp vstřikovacího lisu.
- 2) Vytvořte koncepci zahrnující mechanickou, elektrickou a softwarovou část.
- 3) Realizujte a elektrifikujte zařízení.
- 4) Implementujte řízení spolu se softwarovým vybavením.
- 5) Otestujte funkčnost a vyhodnoťte vlastnosti.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Olmsted, A., Davis, M. Practical Injection Molding. CRC Press, 2001. ISBN: 9780824705299.

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 24.5.2021

Vedoucí práce: Ing. Jakub Arm, Ph.D.

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Práce se věnuje návrhu prototypu vstřikovacího lisu pro firmu Elzaco spol. s r.o. V práci je popsán vstřikovací lis po jednotlivých komponentech, je popsána jejich funkčnost a důležité parametry. Na základě rozboru a stanovení kritických parametrů lisu je vytvořena mechanická konstrukce vstřikovacího lisu. Dále jsou stanoveny požadavky na elektrické komponenty, na základě těchto požadavků jsou komponenty vybrány a je též vytvořen řídicí software. Celé zařízení je sestaveno a dílčí části jsou otestovány.

Klíčová slova

vstřikovací lis, zpracování plastů, plastifikace, konstrukce, řízení teploty, řídicí systém

Abstract

This work deals with the design of a prototype injection molding machine for the company Elzaco spol. s r.o. The work includes theoretical analysis which breaks down injection molding machine into individual components and describes their functionality and their important parameters. Based on the analysis and determination of critical parameters of the injection molding machine, a model of the injection molding machine is created. Furthermore, the requirements for electrical components are determined, based on these requirements, the components are selected, and control software is also created. The machinery is assembled, and each component is tested.

Keywords

injection moulding machine, plastic injection, plastification, mechanical construction, temperature control, control system

Bibliografická citace

CIKRYT, Adam. Prototyp vstřikovacího lisu. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/130340> . Semestrální práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Jakub Arm.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Adam Cikryt</i>
VUT ID studenta:	<i>211134</i>
Typ práce:	<i>Bakalářská práce</i>
Akademický rok:	<i>2020/21</i>
Téma závěrečné práce:	<i>Prototyp vstřikovacího lisu</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 20.května 2021

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Jakubu Armovi Ph.D. za odborné vedení, konzultace a podnětné návrhy k práci. Dále bych rád poděkoval firmě Elzaco spol. s r.o. za možnost realizace zařízení a jmenovitě Bc. Ladislavu Valentovi a Bc. Janu Novotnému za podnětné návrhy v průběhu stavby zařízení.

V Brně dne: 20.května 2021

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	8
SEZNAM TABULEK.....	9
ÚVOD	10
1. VSTŘIKOVACÍ LIS.....	11
1.1 PROCES VSTŘIKOVÁNÍ PLASTU	11
1.2 ELEKTRICKÝ VSTŘIKOVACÍ LIS.....	12
1.3 HYDRAULICKÝ VSTŘIKOVACÍ LIS	12
1.4 HYBRIDNÍ VSTŘIKOVACÍ LIS	12
1.5 ZÁKLADNÍ POPIS VSTŘIKOVACÍHO LISU.....	13
1.6 PLASTIFIKAČNÍ JEDNOTKA	13
1.6.1 Šnek.....	13
1.6.2 Jednocestný ventil	14
1.7 TOPNÁ TĚLESA	15
1.8 MĚŘENÍ TEPLoty	15
1.9 FORMA	16
1.10 SVĚRACÍ JEDNOTKA.....	17
2. ELEKTROMECHANICKÝ NÁVRH	19
2.1 BLOKOVÉ SCHÉMA LISU	20
2.2 MECHANICKÁ KONSTRUKCE	20
2.2.1 Plastifikační jednotka.....	21
2.2.2 Formy.....	22
2.2.3 Pohyb forem.....	23
2.3 MOTORY A PŘEVODOVKA.....	24
2.4 NÁVRH TOPNÝCH TĚLES	25
2.5 MĚŘENÍ TEPLoty	27
2.6 NAPÁJENÍ.....	27
2.7 ŘÍDICÍ ELEKTRONIKA	27
3. NÁVRH ŘÍDICÍHO SYSTÉMU	30
3.1 UŽIVATELSKÉ MENU	31
3.2 STAVOVÉ AUTOMATY.....	32
3.2.1 Automatický režim.....	32
3.2.2 Manuální režim	33
3.3 OHŘÍVÁNÍ VÁLCE	34
3.3.1 Zjišťování parametrů soustavy.....	34
3.3.2 Návrh regulátoru	35
3.4 OVLÁDÁNÍ POHYBU FORMY A ŠNEKU	37
4. REALIZACE STROJE.....	39
5. ZÁVĚR.....	41
6. BIBLIOGRAFIE	42

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Průběh tlaku během vstřikování [2]	12
1.2	Blokové schéma vstřikovacího lisu [7, s. 3]	13
1.3	Geometrie šneku pro vstřikovací lis [8, s. 5]	14
1.4	Jednocestný ventil [9, s. 13]	15
1.5	Řez formou vstřikovacího lisu [12]	16
1.6	Hydraulický mechanismus pohybu forem [14]	17
1.7	Pákový mechanismus pohybu forem [15]	18
2.1	Blokové schéma rozložení lisu	20
2.2	Blokové schéma elektrických komponent	20
2.3	Navržená plastifikační jednotka	21
2.4	Navržené formy	23
2.5	Navržený posuvný mechanismus	24
2.6	Převodovka s motorem Nema34	25
2.7	Topná tělesa s termočlánky	26
2.8	Plošný spoj řídicího systému	28
2.8	Ovládací panel	29
3.1	Blokové schéma Moorova stavového automatu	30
3.2	Vývojový diagram uživatelského menu	31
3.3	Stavový automat - Automatický režim	32
3.4	Stavový automat- Manuální režim	33
3.5	Zjednodušené regulační schéma ohřívání válce	34
3.6	Regulační schéma ohřívání válce	36
3.7	Průběh regulace teploty- Zóna 1	36
3.5	Průběh regulace teploty- Zóna 2	37
4.1	Lis s ovládacím panelem.	39
4.2	Zapojení rozvaděče pro testovací účely	40
5.1	Trapézový šroub [28]	47
5.2	Rozložení topných zón	48
6.3	Lis s testovacím rozvaděčem	50
6.4	Lis s ovládacím panelem	50
6.6	Uživatelské menu lisu-Manuální režim	51
6.5	Uživatelské menu lisu-Automatický režim	51
6.4	Aproximace soustavy S_{11}, S_{12}	52
6.5	Aproximace soustavy S_{22}, S_{21}	53

SEZNAM TABULEK

2.1	Návrhové parametry lisu	19
5.1	Parametry šneku	46
5.2	Parametry trapézového šroubu	47
5.3	Tepelné kapacity dílčích materiálu plastifikační jednotky	48

ÚVOD

Tato práce se věnuje návrhu prototypu vstřikovacího lisu pro firmu Elzaco spol. s r.o., která se věnuje výrobě jednoúčelových strojů na zakázku a malým vodním elektrárnám. Vstřikovací lis má firmě sloužit jako doplňující stroj pro velkosériovou výrobu plastových komponent, které není efektivní vyrábět pomocí 3D tisku. Vstřikovací lis je primárně určen pro výrobu malých komponent.

Práce je členěná do 4 hlavních částí, z nichž první se zabývá problematikou vstřikovacích lisů a vstřikování plastů a přibližuje čtenáři, jak vstřikovací lis funguje a z čeho se skládá. V navazující kapitole je na základě rozboru a stanovení kritických parametrů lisu vytvořen detailní 3D model vstřikovacího lisu v programu Autodesk Inventor. Při návrhu lisu je dbáno na dodržení stanovených parametrů i na samotnou funkčnost a realizovatelnost návrhu. V této kapitole jsou stanoveny požadavky na elektrické komponenty jako jsou motory, napájecí zdroje, topná tělesa, snímače teplot, řídicí elektronika. Vybrané komponenty je možné využít při realizaci stroje. Samostatná kapitola je věnována způsobu řízení lisu za pomoci stavového automatu a je popsán řídicí software. Taktéž je rozebrán způsob identifikace soustavy a následná regulace teploty. Poslední kapitola popisuje proces realizace stroje včetně testování.

Cílem této práce je navrhnout prototyp vstřikovacího lisu, vytvořit mechanický a elektrický návrh, dále definovat požadavky na komponenty a rozebrat způsob řízení. Dle návrhu sestavit funkční zařízení a odzkoušet řídicí systém. Na základě informací v následujícím textu by mělo být možné vyrobit a zprovoznit vstřikovací lis.

1. VSTŘIKOVACÍ LIS

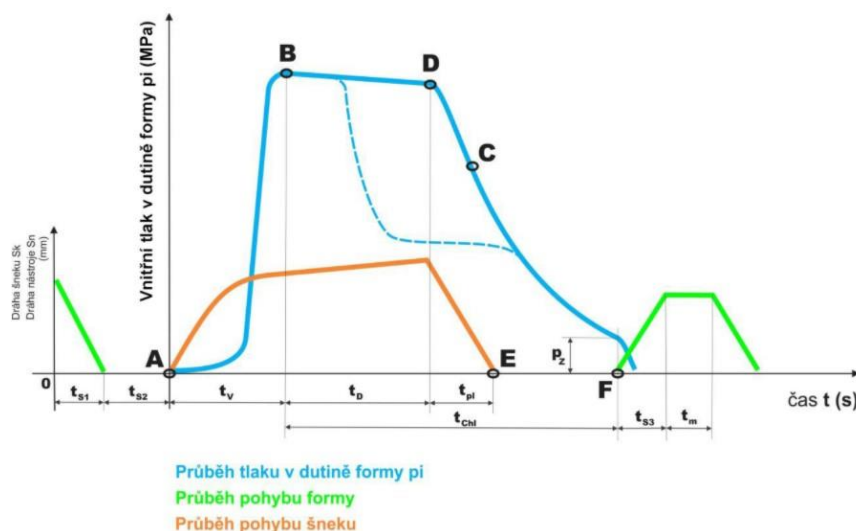
Vstřikovací lis je stroj, který se uplatňuje ve velkosériové výrobě většiny plastových komponent, které jsou využívány pro spotřební elektroniku, v automotive průmyslu a v elektrotechnickém průmyslu. Tato technologie byla poprvé patentována v roce 1872 a od té doby se rozrostla do téměř všech výrobních odvětví. Vstřikovací lis je zařízení, které za pomoci plastifikační jednotky přemění plastový granulát na tekutý plast, který je vstříknut do předem připravené formy. Plast ve formě zchladne a ztuhne, čímž si ponechá tvar dutiny formy. Za pomoci vstřikovacího lisu je možné vyrábět celou škálu plastových výrobků od kostiček Lega, těla mobilních telefonů až po nárazníky automobilů, kryty praček. Jedinou limitací na velikost výrobku je samotná vstřikovací forma. [1]

1.1 Proces vstřikování plastu

Jedná se o nejpoužívanější proces pro výrobu plastových dílů, při kterém je materiál roztaven a vstříknut pomocí šneku do připravené formy, ve které ztuhne a ponechá si přesný tvar formy, do které byl vstříknut. Přeměna plastového granulátu probíhá v plastifikační komoře, která za pomoci tepla a tření taví plast a šnek jej dává do zásobníku. Plastifikovaný plast v zásobníku je následně pod tlakem (60-120MPa) vstříknut do předeřtuté formy, ve které se ochladí a ztuhne. Po ochlazení se formy otevrou a výrobek je vyražen z formy. Celý cyklus se pohybuje od desítek sekund až po minuty v závislosti na velikosti výrobku, typu plastu. [2] Vstřikovací cyklus je možné popsat průběhem tlaku v komoře formy na čase, dle obrázku 1.1 **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** [2]

Jako počátek cyklu zvolíme stav, kdy jsou formy rozevřené, dutina formy je prázdná. Cyklus začíná sevřením forem, který je znázorněn strojním časem t_{s1} , v případě, že je i vstřikovací jednotka pohyblivá, je pro její pohyb vyhrazen čas t_{s2} . V bodě A začíná axiální pohyb šneku ve válci plastifikační jednotky a začíná vstřikování plastu do formy. Průběh tlaku v dutině formy je znázorněn modrou křivkou. Doba vstřikování se značí t_v a v závislosti na velikosti dutiny trvá po dobu 2 až 5 sekund. [3, s. 46] V bodě B je dosaženo maximálního tlaku a dutina je naplněna přibližně z 95-97 %. Protože se tavenina vlivem chladnutí smršťuje, je nutné, aby se do komory stále tlačil nový plast a tím se kompenzovalo smršťování. Tento proces se nazývá dotlak a probíhá po dobu t_D . Může probíhat za konstantního tlaku (plný průběh) nebo za klesajícího tlaku (čárkovaný průběh). Doba dotlaku končí v bodě D, kdy plast ve vstupním kanálku plně zatuhnul. V bodě C je materiál v dutině formy ztuhlý a dále se jen chladí. Doba chlazení začíná od bodu B, značí se t_{CH} . Ihned po skončení doby dotlaku, šnek začíná chystat další dávku plastu po dobu t_{pl} . Šnek se v této chvíli pohybuje nejen radiálně ale i axiálně. Po skončení doby chlazení se formy rozevrou a

výrobek je odebrán z dutiny, na to je vyhrazen čas t_{S3} a t_M . Odebráním výrobku začíná další cyklus. [2]



Obrázek 1.1 Průběh tlaku během vstřikování [2]

1.2 Elektrický vstřikovací lis

Zařízení je možné charakterizovat jako plně elektrické, pokud je pro veškeré pohyby využito elektrických motorů. Výhodou těchto lisů je nižší spotřeba energie, přesnost při pozicování forem a při dávkování plastu. Dokáží rychleji dosáhnout provozního stavu a jsou méně hlučné v porovnání s hydraulickými lisy. [4]

1.3 Hydraulický vstřikovací lis

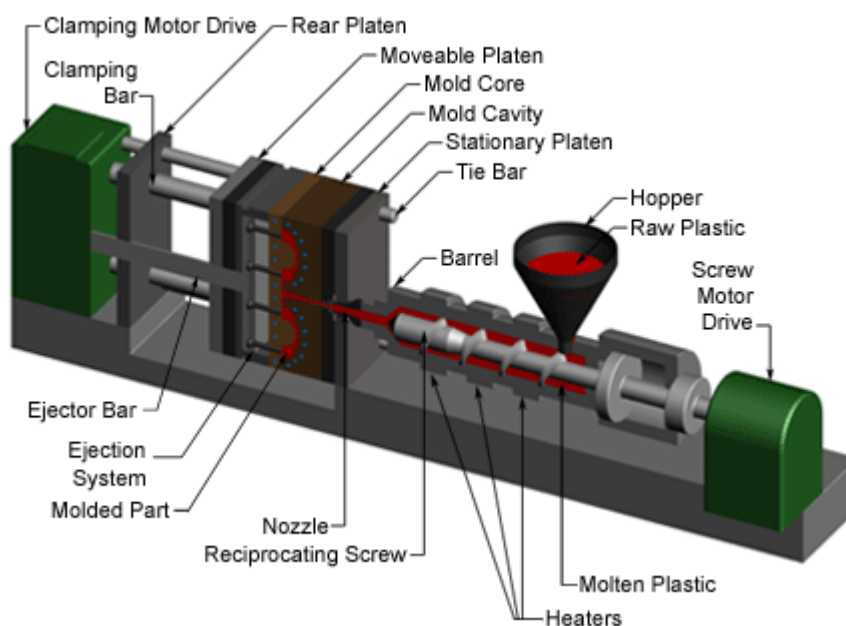
Pohyb forem a šneku je realizován pomocí hydraulických válců a motorů. Jedná se o nejstarší typ lisu, který je využíván i dnes. Jeho výhodou je velká upínací deska a tím schopnost vyrábět rozměrné díly, vysoká přítlačná síla forem, nízké pořizovací náklady. [5]

1.4 Hybridní vstřikovací lis

Jak název vypovídá, u tohoto typu lisů dochází ke kombinaci obou výše uvedených provedení za účelem vytvoření univerzálního stroje. Arburg, německý výrobce lisů, u své řady hybridních lisů využívá pro pohyb forem elektrický pohon kvůli přesnosti a rychlosti a pro posun šneku, a tedy vstříknutí plastu do formy využívá hydraulický pohon pro dosažení optimálních vstřikovacích tlaků. [6]

1.5 Základní popis vstřikovacího lisu

Ačkoli lisy od různých výrobců mohou vypadat odlišně, všechny sdílí fundamentální komponenty, které jsou rozebrány v následujících kapitolách. Plastifikační jednotka obsahuje válec, šnek, topná tělesa, jednocestný ventil. Forma se skládá z pohyblivé a statické části, desky s vyřezávacími kolíky, chladicími kanály. Svěrací mechanismus drží formy sevřené v průběhu vstřikování plastu. Ovládací panel umožňuje nastavení všech parametrů lisu pro dosažení co nejlepších parametrů výroby.



Obrázek 1.2 Blokové schéma vstřikovacího lisu [7, s. 3]

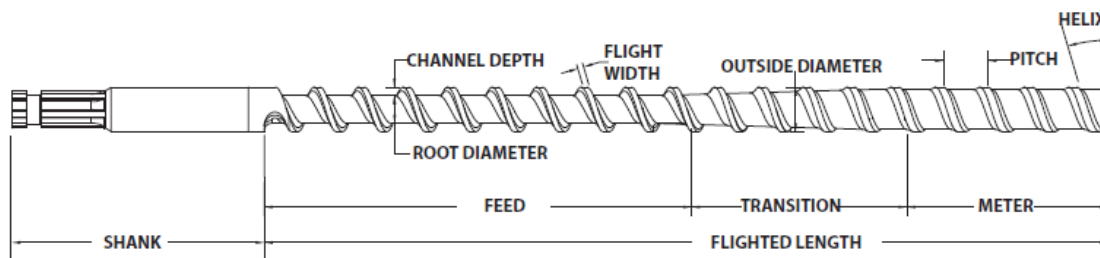
1.6 Plastifikační jednotka

Úkolem plastifikační jednotky je z dodaného granulátu plastu vytvořit homogenní směs, která může být vstříknuta do dutin formy. Jednotka obsahuje šnek, který dopravuje a mixuje směs, jednocestný ventil, který má zabránit zpětnému šíření plastu a samotný válec, který je ohříván pomocí objímkových ohříváčů.

1.6.1 Šnek

Šnek se používá k dopravě granulátu ze vstupní části válce až k trysce. Během této činnosti je plast zahříván teplem ze stěn válce, třením o šnek a vzájemným třením částic plastového granulátu. Šnek slouží zároveň i jako mixér, který spojuje pigmentovaný plast s čistým granulátem. Návrh geometrie šneku je ovlivněn mnoha faktory, jako jsou určení, zda bude použitý ve vstřikovacím lisu nebo v extruzním stroji, druh plastu, který má být přepraven, množství plastu vstříknutého během jednoho cyklu. Tyto a další

faktory je nutné vzít do úvahy při návrhu optimálního šneku. Šnek je dělen do 3 částí a každá plní svoji důležitou roli, viz 1.3. Vstupní zóna (z angl. Feed zone) slouží k přesunu plastového granulátu od násypky, průměr šneku je konstantní. V přechodné zóně (z angl. Transition zone) se plast začíná tavit, průměr šneku se zvětšuje. V koncové části (z angl. Meter zone) je plast plastifikován, dochází k rovnoměrnému prohřátí směsi, která je přesouvána před jednocestný ventil.



Obrázek 1.3 Geometrie šneku pro vstřikovací lis [8, s. 5]

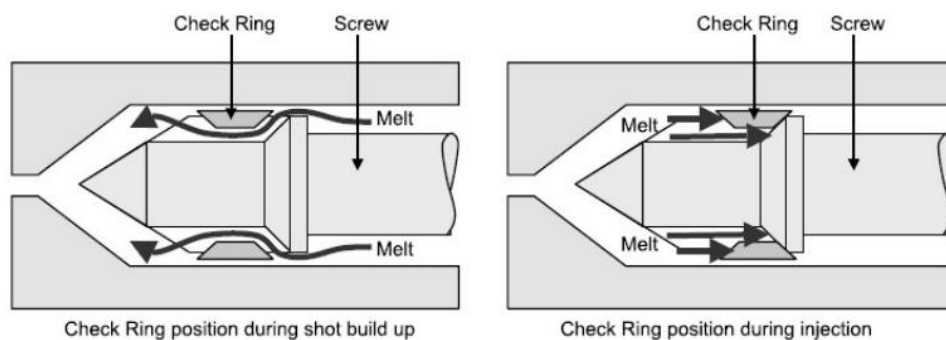
Délka šneku je ovlivněna jeho průměrem, poměr Délka/Průměr (z angl. Length/Diameter ratio). Tento poměr se může pohybovat v rozmezí 24:1 až po 30:1 pro extruzní stroje, pro vstřikovací lisy se většinou volí poměr 20:1, ale pokud je nutnost delší doby plastifikace plastu, tento poměr se může zvětšit až na 24:1. [8, s. 5]

Kompresní poměr je další důležitý parametr, který udává poměr mezi průměrem šneku ve vstupní a koncové části. Pro vstřikovací lis se používá nejčastěji poměr 2,5:1, jeho hodnota se může pohybovat v rozmezí 1,5:1 až po 4:1 dle aplikace.

Stoupání závitu šneku ovlivňuje, jak rychle/pomalů bude plast dopraven do koncové části. Větší stoupání závitu se volí, pokud plast vyžaduje krátkou dobu setrvání v rozpuštěném stavu.

1.6.2 Jednocestný ventil

Komponent se nachází na konci šneku a jeho úkolem je vytvořit při vstřikování plastu těsný spoj, který nedovolí uniknout plastu zpět do šneku. Celý šnek je uložen ve válci na volno a jediný těsnicí prvek je právě jednocestný ventil, díky kterému je možné dosáhnout enormních tlaků pohybujících se v rozmezí 40MPa až 140MPa. [1, s. 32] [3, s. 16]



Obrázek 1.4 Jednocestný ventil [9, s. 13]

1.7 Topná tělesa

U téměř všech lisů se používají obručové ohřivače, které se sevrou kolem válce a umožňují tak cíleně ohřívat jen danou část válce. Pro snížení nákladů na ohřívání a zrychlení nahřívání se celý válec zabalí do izolující deky, která omezí množství tepla vyzářeného do okolí. [3, s. 30]

Mica ohřivače mají nejjednodušší konstrukci, která obsahuje pouze odporový drát, který je uložen v kovovém těle, jež je opatřeno svorkou. Umožňují dosáhnout až 480°C, dosahují výborné tepelné vodivosti a jsou nejlevnější variantou. Běžně dosahují 20-45W/in². [8, s. 9]

Keramické ohřivače mají odporový vodič zapuštěný v keramické izolační vrstvě, která teplo směřuje k válci. Ohřívání se děje jak vedením, tak i zářením. Díky izolační vrstvě je povrch ohřivače chladnější než jeho vnitřní strana, např. 200°C na obalu při vnitřní teplotě až 600°C. Běžně dosahují 20-45W/in². [8, s. 9]

MI ohřivače jsou používány v aplikacích, které vyžadují dosažení vysokých teplot. Izolační vrstva obsahuje minerální izolaci, která odděluje odporový vodič od ocelového krytu. Jsou velmi podobné Mica ohřivačům, avšak dosahují mnohonásobně lepšího poměru W/in², obvykle 20-150W/in². [8, s. 9]

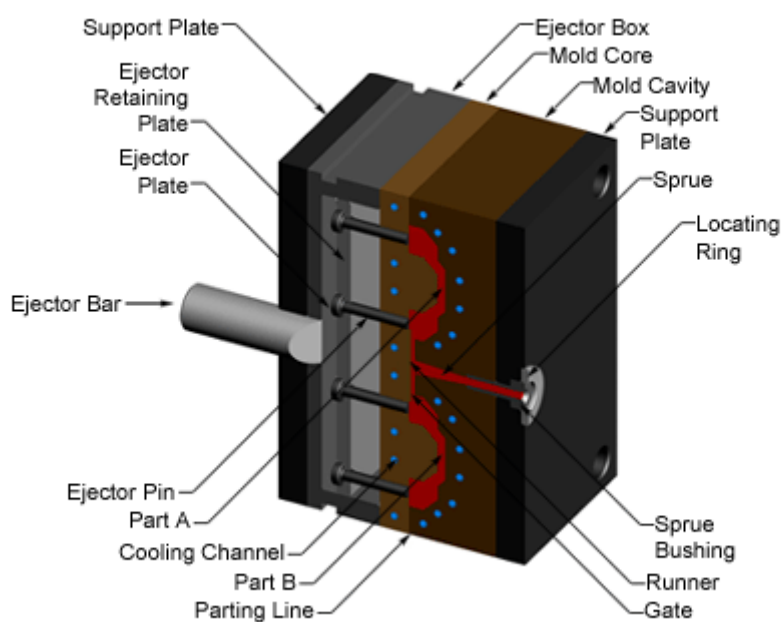
1.8 Měření teploty

Pro měření teploty plastu a formy je možné využít termočláanky, které jsou velmi používané kvůli jejich nízké ceně, teplotnímu rozsahu a rychlé odezvě, nevýhodou je horší přesnost (0,5-5 °C). U termočláanků je nutná teplotní kompenzace studeného spoje, tedy místa, kde jsou termočláankové vodiče spojené s měřícím zařízením. Tato kompenzace se provádí softwarově nebo lze využít převodníku, který má v sobě již zabudovaný snímač teploty a kompenzaci provádí sám. [10, s. 81] [11]

Další možností je využití odporového snímače teploty (RTD), který má menší teplotní rozsah, ale dosahuje lepší přesnosti (0,15-1,2 °C), linearity. Vyžívá změny vodivosti odporového materiálu při změně teploty. Při použití RTD se udržuje konstantní proud a měří se úbytek napětí na odporovém elementu. To vyžaduje komplexnější měřicí aparát a vzniká problém se samoohříváním snímače vlivem protékajícího proudu. [10, s. 78]

1.9 Forma

Forma představuje samotné srdce celého vstřikovacího lisu. Právě tato komponenta udává tvar výrobku, určuje, jaké jsou nároky na vstřikovací tlak, jaká síla je potřebná k sevření forem. Skládá se ze 2 nebo více pohyblivých částí, které při spojení vytvoří dutinu o přesných rozměrech finálního výrobku. Tvorba dutiny formy se vytváří klasickým obráběním, nebo se používá i metoda jiskrového obrábění, které umožňuje výrobu extrémně přesných forem, komplexních tvarů, nebo jemnou texturu, které by nebylo možné dosáhnout konvenčním obráběním. [3, s. 139]



Obrázek 1.5 Řez formou vstřikovacího lisu [12]

Protože vstříknutý plast se během chladnutí smršťuje, dochází k přichycení výrobku na pohyblivém těle formy. Pro shoení se využívají vyhazovací kolíky (z angl. Ejector pins), které jsou během vstřikování ukryté ve formě, ale při rozevření forem vyjedou a vytlačí výrobek z formy. Správné rozmístění a počet kolíků je důležitý, aby při vyražení

nedošlo k poškození výrobku a zároveň aby stopy, které kolíky zanechají, nevadily estetické stránce výrobku. [3, s. 143]

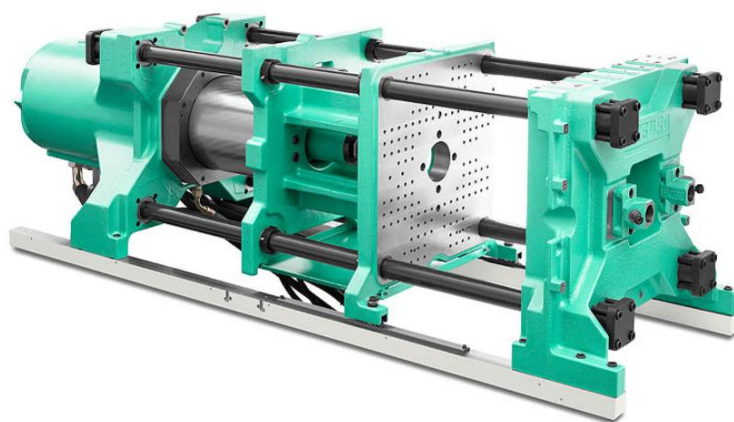
Pro vedení plastu do a ve formě se využívají kanálky tzv. vtoky (z angl. Runner). Jejich účelem je roztavený plast nasměrovat a dopravit do dutiny. Pro komplexní formy, které jsou schopné generovat velké množství výrobků se využívají horké vtoky, které jsou vyhřívány a díky tomu se prodlužuje doba, kdy je plast tekutý. [3, s. 142]

Chladicí kanálky jsou vedené skrz formu v co nejmenší vzdálenosti od samotné dutiny, aby se zajistilo optimální chlazení plastu v dutině a zbytečně se nemarnila chladicí kapacita na chlazení formy, která může být vyhřívána.

1.10 Svěrací jednotka

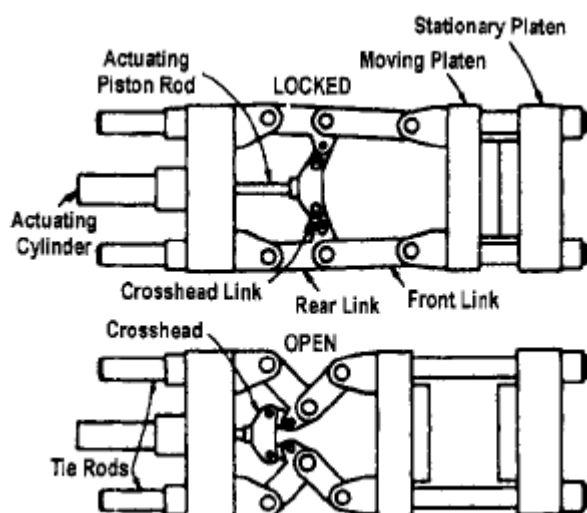
Svěrací jednotka v sobě zahrnuje upínací desky a samotný mechanismus uzavírání. V průmyslu se nejčastěji používají 2 základní mechanismy uzavírání forem. První a starší je využití hydraulického válce, a novější využívá pákový mechanismus. Celá jednotka musí být dostatečně pevná, aby bylo zajištěno přesné sevření forem, zároveň musí být schopná vytvořit dostatečně velkou sílu pro sevření forem, aby během procesu vstřikování plastu nedošlo k mírnému rozevření forem a vzniku otřepů. [1, s. 37] Svěrací jednotky jsou rozlišovány podle síly, které dokážou vyvinout.

Hydraulické uzavírání forem obsahuje hydraulický válec, který je spojen s pohyblivou upínací deskou. Výhodou tohoto systému je plynulý náběh tlaku po dosednutí forem na sebe, snadná regulace potřebného tlaku, s jeho využitím je možné se přizpůsobit velkému množství designu forem a různým vstřikovacím tlakům. Tento mechanismus se používá při lisování velkých dílů. Je možné dosáhnout sil od 500kN po 250MN. Nevýhodou je nutnost udržování tlaku ve válci po celou dobu vstřikování, což klade větší nároky na celý hydraulický systém. Dále je mechanismus rozměrnější. [1, s. 37] [13]



Obrázek 1.6 Hydraulický mechanismus pohybu forem [14]

Obrázek 1.7 Pákový mechanismus pohybu forem [15]



2. ELEKTROMECHANICKÝ NÁVRH

V této kapitole je rozebrán postup návrhu elektromechanické konstrukce vstřikovacího lisu, výběr mechanických a elektrických komponentů.

Inspirace pro návrh lisu byla čerpána z příruček od výrobců lisů, z prohlídky trhu s malými vstřikovacími lisy a z videí na internetu. Z průzkumu byly zjištěny charakteristické vlastnosti (vstřikovaný objem, přítlačná síla forem, vnější rozměry...), které jsou dále použité jako parametry lisu, kterých by mělo být dosaženo.

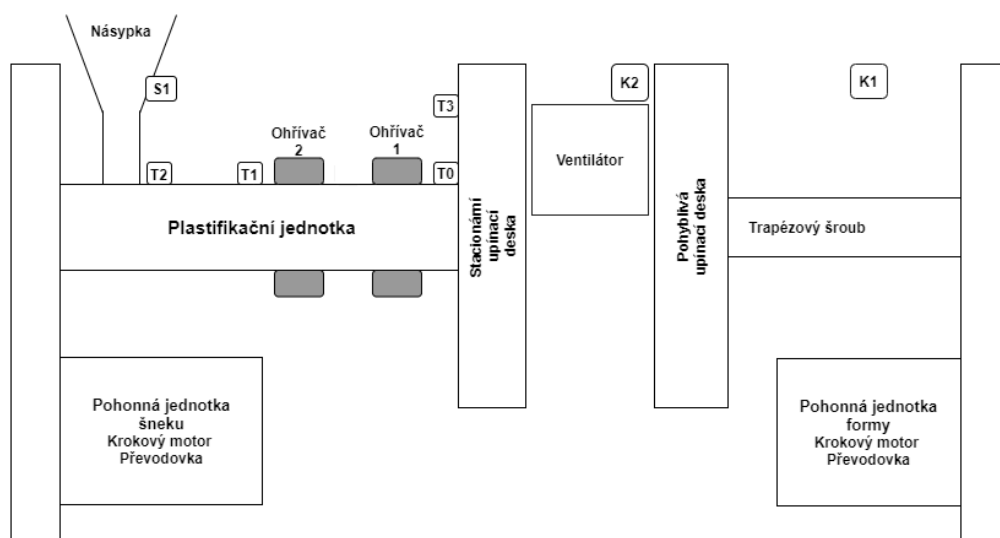
Z elektrotechnického pohledu na lis jsou používány nejčastěji Mica ohřívače, u nejmenších lisů se vstřikovacím objemem 1 cm³ je používán pouze 1 ohřívač, většinou jsou použity právě 2 ohřívače a u komerčně prodávaných lisů až 4 ohřívače, aby bylo zajištěno rovnoměrné prohřívání plastu. Pro měření teploty je využíváno termočlánků umístěných na plastifikačním válci, formě, případně na trysce válce, kvůli co nejpřesnějšímu změření teploty vstřikovaného plastu.

Pro pohyb šneku a formy jsou využity krokové motory např. Nema34, Nema42. Snímání polohy je řešeno rotačním snímačem polohy na hřídeli motoru či ultrazvukovým senzorem, který měří vzdálenost mezi formami či pouhými koncovými spínači, které svou pozicí definují limitní stavy, kam se forma může posunout. Měření objemu granulátu v zásobníku je řešeno buď kapacitním snímačem nebo optickou bránou.

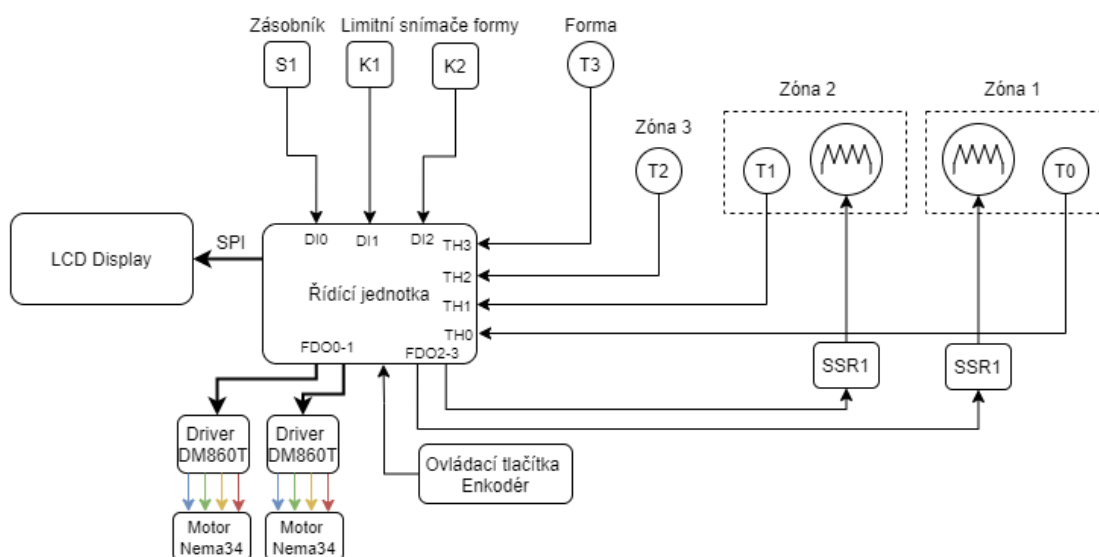
Tabulka 2.1 Návrhové parametry lisu

Parametr	Hodnota	Popis
Přítlačná síla	2 tuny	Síla, kterou jsou formy stlačeny
Rozměr formy	70x70 mm	Maximální rozměr vyměnitelné formy
Rozevření forem	90 mm	
Průměr šneku	20 mm	
Vstřikovaný objem	do 10 cm ³	Maximální objem plastu, který je vstříknut v 1 cyklu
Rozměry hlavní konstrukce	250x260x650 mm	šířka, výška, délka
Počet topných zón	2	

2.1 Blokové schéma lisu



Obrázek 2.1 Blokové schéma rozložení lisu



Obrázek 2.2 Blokové schéma elektrických komponent

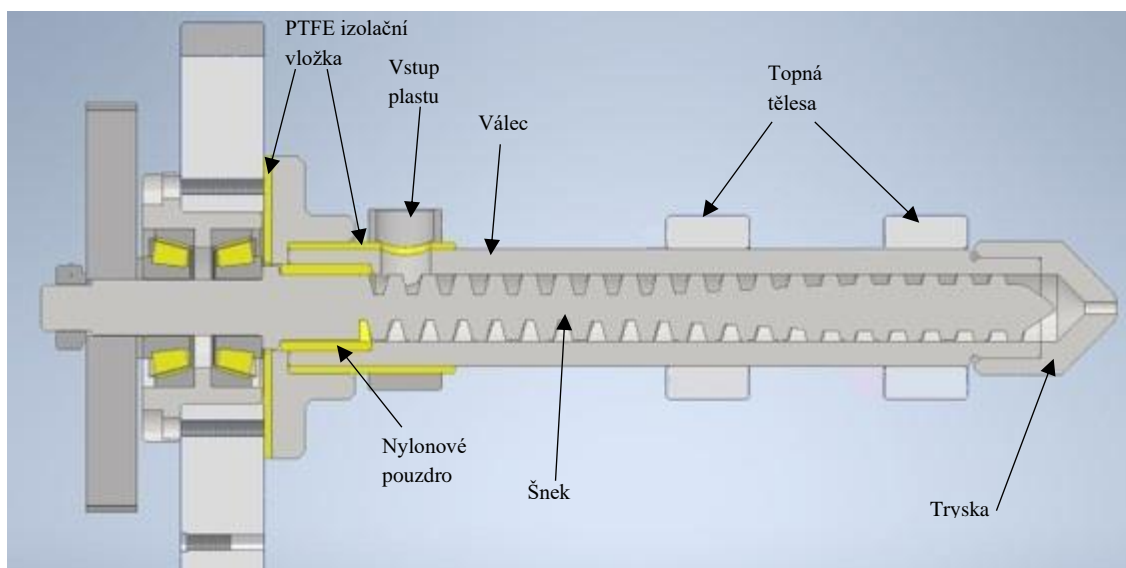
2.2 Mechanická konstrukce

Při návrhu bylo cílem vytvořit co nejjednodušší konstrukci, která splní uvedené požadavky, bude jednoduchá na výrobu a údržbu a umožní případné budoucí úpravy.

Inspirace pro návrh byla čerpána z již vyrobených vstřikovacích lisů pro hobby použití, z knížek výrobců vstřikovacích lisů a dalších příruček. Jejich společným faktorem bylo použití 2 nebo 4 vodicích tyčí, které prochází celým tělem lisu a tvoří hlavní nosnou konstrukci. Pro rotační pohyb šneku byl použitý krokový motor a řemenový či ozubený převod, který zvyšoval moment motoru. Pro posun upínací desky byl využit trapézový šroub s maticí, které byla spojena s převodovkou pro znásobení momentu motoru. Proto byla mechanická stránka stroje postavena na již funkčních mechanismech jen s úpravami, které byly nutné, aby se dosáhlo požadovaných parametrů. [16] [17]

Z výše uvedených možností řešení byly pro vyráběný stroj vybrány ty nejvíce vyhovující a byly implementovány do návrhu. Výběr, zpracování a další informace se nacházejí v následujících kapitolách.

2.2.1 Plastifikační jednotka



Obrázek 2.3 Navržená plastifikační jednotka

Při návrhu geometrie šneku bylo vycházeno z konvenčně používaných šneků, jen bylo nutné změnit délku z důvodu definovaných rozměrů stroje. V prvních iteracích návrhu byl vytvořen mechanismus zajišťující axiální pohyb šneku, který byl následně zavržen z důvodu prostorové náročnosti, proto šnek bude vykonávat pouze radiální pohyb a pomocí šroubovice bude dopravovat taveninu do formy. Z výše uvedené modifikace nedává smysl, aby šnek byl vybaven jednocestným ventilem, který by zabránil při vstřikování plastu do formy jeho návratu do zásobníku. Geometrie šneku byla navržena podle příručky [8, s. 5], Délka závitu je 200 mm, poměr délky

jednotlivých zón je 10:5:5 (vstupní, prostřední, koncová), celková délka je 301 mm. Kompresní poměr je 1,75, stoupání závitu 8 mm bylo navrženo tak, aby plast setrval delší dobu v jednotlivých topných zónách a stihl se plně roztavit, snižováním stoupání navíc klesají nároky na potřebný moment, což byl důležitý faktor. Konec šneku byl uložen do nylonového kluzného pouzdra, aby se vymezily vůle mezi šnekem a válcem, které je potřeba ponechat kvůli rozpínání vlivem tepla. Osa šneku byla uložena ve dvojici kuželíkových ložisek (30303), která jsou vhodná pro použití v místech, kde se vyskytuje jak radiální, tak axiální namáhání.

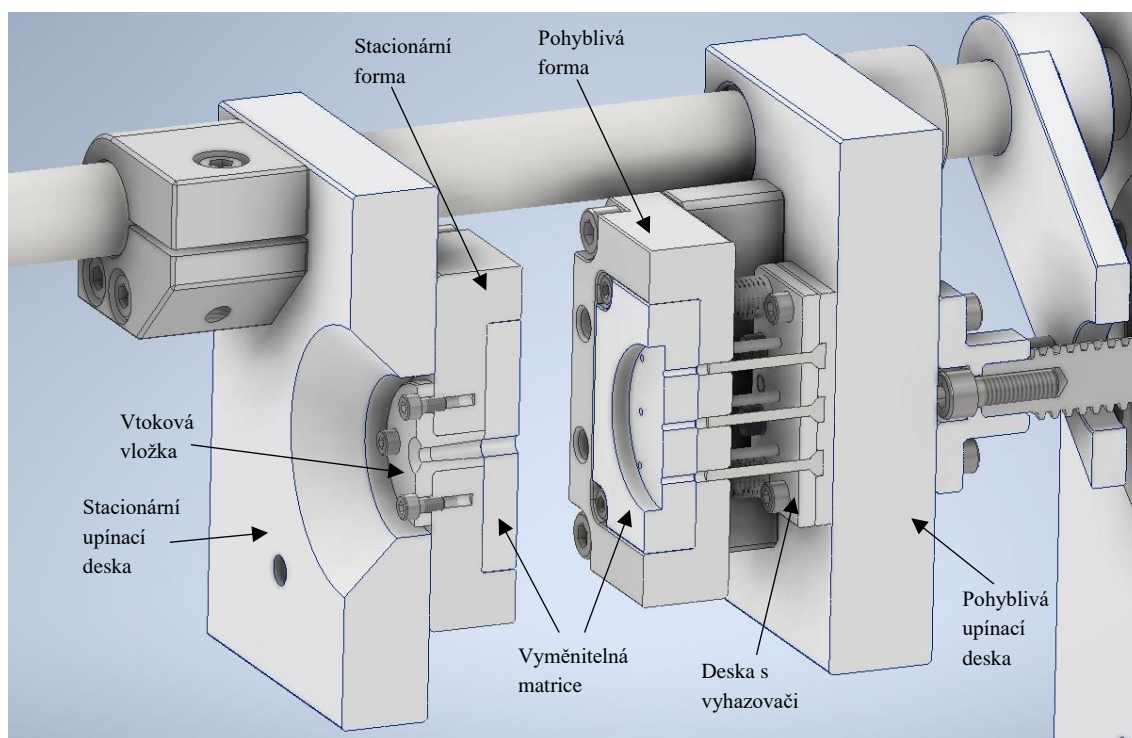
Radiální pohyb šneku byl zajištěn použitím krokového motoru Nema 34 [18], který byl vybrán na základě výpočtu A.2. Motor je spojen s převodovkou, která zvyšuje jeho krouticí moment. Ke krokovému motoru je připojen driver DM860T [19], který vyhovuje výkonovým nárokům motoru.

2.2.2 Formy

Při tvorbě forem byla důležitým faktorem univerzálnost, jednoduchost výměny a kompaktní provedení. V této části není probrán návrh formy pro jeden konkrétní výrobek, protože proces návrhu dobré formy je nad rámec této práce, ale je probrán návrh upínacího přípravku a koncepčního uspořádání.

Formy jsou složeny ze 3 základních částí: stacionární, pohyblivá forma a deska s vyrážeci. Stacionární část formy obsahuje vtokovou vložku, kanály, negativ části lisovaného výrobku a je spojená s plastifikační jednotkou. Pohyblivá polovina formy obsahuje negativ větší části výrobku a vyhazovací kolíky. Vyhazovací kolíky jsou upevněné na vlastní posuvné desce, která je aktivována při otevírání forem. Jejich účel je vytlačení výrobku z dutiny formy.

Formy obsahují dutinu na výměnnou matici, tím bylo docíleno univerzálnosti, protože pro změnu výroby stačí vyměnit matici, která je na výrobu v porovnání s frézováním kompletních nových forem levnější. U vyhazovacích kolíků byla vytvořena matice děr, která dodává variabilitu rozložení a tím ušetří práce s výrobou při změně výrobku.



Obrázek 2.4 Navržené formy

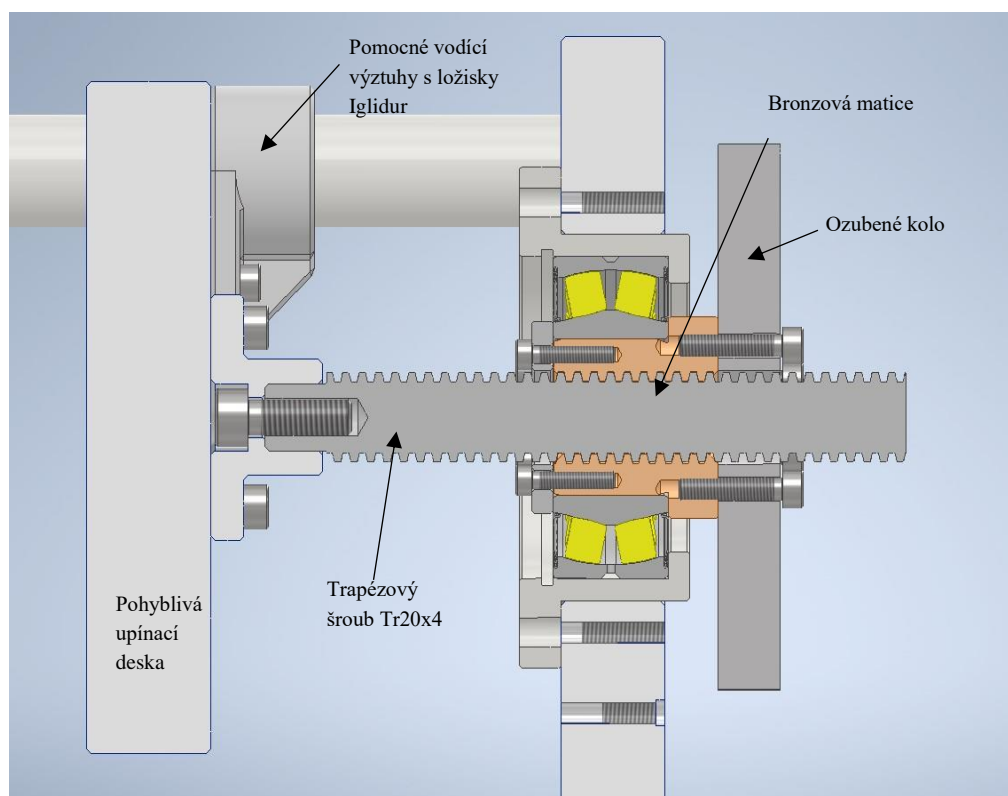
2.2.3 Pohyb forem

Návrh mechanismu forem byl výrazně ovlivněn již vytvořenými stolními vstřikovacími lisami, které využívají pohybový šroub pro vytvoření axiálního pohybu. Byla zvolena kombinace trapézového šroubu a bronzové matice. Při volbě vhodného šroubu bylo nutné znát axiální sílu, která působí na šroub. V tomto případě byla axiální síla daná požadavky na lis, tedy 2tuny po přepočtu a přidání bezpečnostní rezervy α , dle (2.1) $F_A \approx 23.5\text{kN}$.

$$F_A = m \cdot g = 2000 \cdot 9.81 = 19620 \cdot \alpha = 19620 \cdot 1,2 = 23544 \text{ N} \quad (2.1)$$

Výpočet šroubu je uveden v Příloze A.1

Z výpočtu vychází jako dostačující řešení šroub Tr12x3, ale z důvodu bezpečnosti a odolnosti byl zvolen šroub Tr20x4. Jak je vidět na Obrázku **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**, šroub je pevně spojen s pohyblivou upínací deskou a bronzová matice přenáší točivý pohyb z ozubeného kola na pohyb posuvný. Vše je uloženo v pouzdře, které je připevněno na koncovou desku lisu. Upínací deska je usazena na vodičí tyče s použitím kluzných ložisek Iglidur, aby byl zajištěn hladký pohyb, deska je osazena pomocnými vodičí výztuhami, které prodlužují styčnou plochu s vedením a tím eliminují kyvný pohyb upínací desky.



Obrázek 2.5 Navržený posuvný mechanismus

2.3 Motory a převodovka

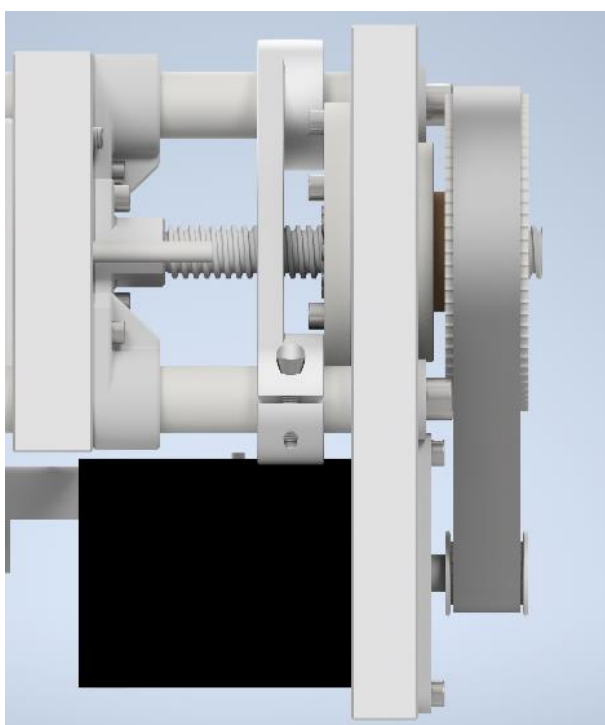
Parametry, které určovaly výběr motorů, byly odvozené z mechanické konstrukce. Protože posun forem vyžaduje přesné polohování, byly zvoleny krokové motory, které umožňují rozdělit otáčení hřídele na menší otáčky. Další možností bylo využití servomotorů, avšak jejich cena při zachování parametrů motoru by byla dvojnásobná. Motory jsou řízené pomocí driveru, který bude ovládán signály Step, Direction a Enable.

Motor pro šnek byl vybrán na základě požadovaného momentu, který vyvolá dostatečně velký tlak v dutině formy. Výpočet potřebného momentu na šneku a převodového poměru je uvedený v Příloze A.2. Na základě výpočtů byl zvolen krokový motor Nema 34 s přídržným momentem 12Nm [18]. Motor byl spojen s převodovkou s poměrem 4.5:1. K motoru byl zvolen driver DM860T [19]. Motor dosahuje při 130 ot/min šneku pouhých 1,5Nm, avšak pro návrh byl podstatný moment při velmi nízkých otáčkách, které jsou nutné ve fázi dotlaku. Dosažený moment na šneku je 40.5 Nm.

Motor pro pohyb forem byl vybrán na základě momentu, který je potřeba, aby se vyvolala přítláčná síla 23kN na formách, proto byl vybrán stejný motor Nema 34 [18] a

driver DM860T [19]. Převodový poměr zůstal stejný, jako je u šneku, je možné dosáhnout momentu 54Nm na trapézovém šroubu, který je dostatečný pro vytvoření přitlačné síly 20kN. Výpočet požadavků na motor a převodovku je uveden v Příloze A.3.

Driver DM860T [19] byl vybrán podle výkonových požadavků motoru, a to 60V DC a jmenovitý proud fází 5A. Použití driveru dále umožní rozdělení jedné otáčky až na 51200 mikrokroků, nastavení maximálního proudu fází, též dokáže minimalizovat proud cívkami motoru, když motor nevykonává rotační pohyb, a tím snížit riziko přehřívání, které je nutné vzít do úvahy, když motor pohybující s formami bude většinu času v maximálním zatížení.



Obrázek 2.6 Převodovka s motorem Nema34

2.4 Návrh topných těles

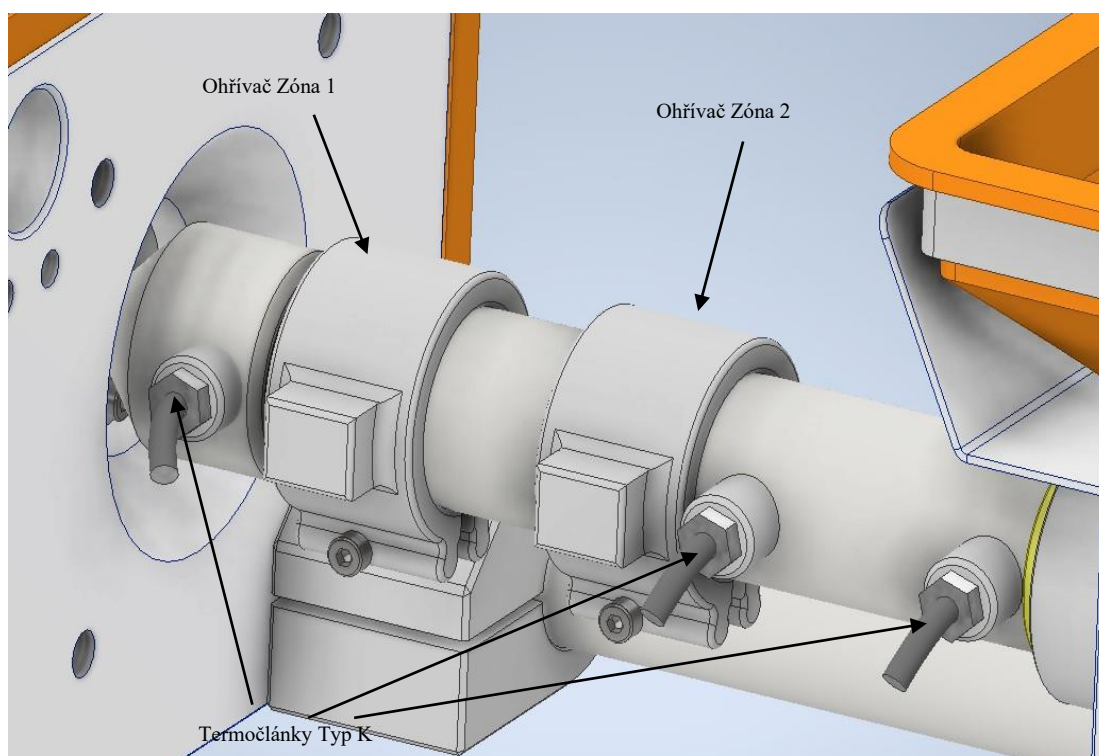
Pro ohřívání plastového granulátu se v plastifikační jednotce využívají 2 zdroje tepla. Teplo od ohřívacích obručí a teplo vznikající třením plastového granulátu o šnek a stěny válce. Vlastnosti používaných ohřívacích obručí jsou popsány v kapitole 1.7. Pro volbu vhodného ohříváče je nutné určit tepelný výkon, který je potřebný pro nahřátí daného množství materiálu v každé zóně na zvolenou teplotu. Tento výpočet je orientační, aby bylo možné vybrat topná tělesa, a je uveden v Příloze A.4. Plastifikační

válce u průmyslových lisů obsahují větší množství topných zón, aby bylo dosaženo co nejlepší možné kontroly ohřívání plastu v celém průběhu plastifikace.

Válec je rozdělen do 2 teplotních zón, které korespondují s rozložením zón šneku, viz 2.7. První zóna se nachází ihned za tryskou plastifikační jednotky, taví plast na požadovanou teplotu a udržuje jej tekutý. Druhá zóna se nachází v prostřední části šneku, která předehtřívá plast na poloviční teplotu tavení, zbavuje plast zbylé vlhkosti.

Při výpočtu nebyly uvažovány ztráty zářením do okolí. Pro splnění požadavku vytopení válce za 5 minut na danou teplotu má být kombinovaný výkon obou topných těles 540 W. Mica obručové ohřívače pro průměr válce 40mm se prodávají ve výkonovém rozsahu 175W až 350W a lze splnit výkonové požadavky [20]. Pro lis byly zvoleny ohřívače s výkonem 350W.

Výkon ohřívačů bude regulován s využitím SSR (solid state relay), které budou spínat fázové napětí, pro každou topnou objímku jedno relé. Na řízení je použito relé od výrobce Schneider electric SSM1A112BD [21], které dokáže spínat až 12A při síťovém napětí 230V AC, výstup je sepnut při průchodech nulou. Relé je ovládané napětím v rozsahu 4 až 32V DC.



Obrázek 2.7 Topná tělesa s termočlánky

2.5 Měření teploty

Měření teploty probíhá ve 3 místech plastifikační zóny, jak je možné vidět na Obrázku 2.7. Dále je měřena teplota formy, pro informaci obsluhy, případně regulaci otáček ventilátoru. Pro měření byly zvoleny termočlánky typu K, kvůli jejich téměř lineární charakteristice a velkému rozsahu teplot a citlivosti. Je možné použití i termočlánků typu J.

Termočlánky jsou připojené k převodníku od výrobce Texas Instrument ADS1118 [22], který obsahuje 16-bit A/D převodník, SPI sběrnici pro komunikaci. Je vybaven interním snímačem teploty, který je použitý pro měření teploty studeného spoje a následné kompenzaci měřené teploty v MCU.

2.6 Napájení

Napájení lisu je členěno do 3 napěťových úrovní. Topná tělesa jsou napájena síťovým napětím 230V AC a regulace výkonu probíhá spínáním SSR. Celková maximální spotřeba je 750W.

Krokové motory a jejich drivery jsou napájeny ze dvou spínaných zdrojů 60V 6,7A o celkovém výkonu 1000W. Vzhledem k výkonovým nárokům bylo při návrhu nutné použít pro každý motor separátní zdroj.

Řídící elektronika a snímače jsou napájeny ze samostatného spínaného zdroje 12V. Pro napájení jednotlivých integrovaných obvodů je využito lokálních stabilizátorů napětí.

Vstřikovací lis je napájen z jednofázové zásuvky, jeho celková maximální spotřeba tedy nesmí přesáhnout 3 600W. Celková maximální spotřeba lisu činí 2 210W, této spotřeby v reálném provozu nebude nikdy dosaženo, protože by bylo nutné, aby motory byly plně zatížené a topná tělesa topila na maximální výkon. Každý lis má proto startovní sekvenci, při které dochází k postupnému prohřívání a během provozu se jen dohřívá vstřikovaný plast a kompenzují se tepelné ztráty.

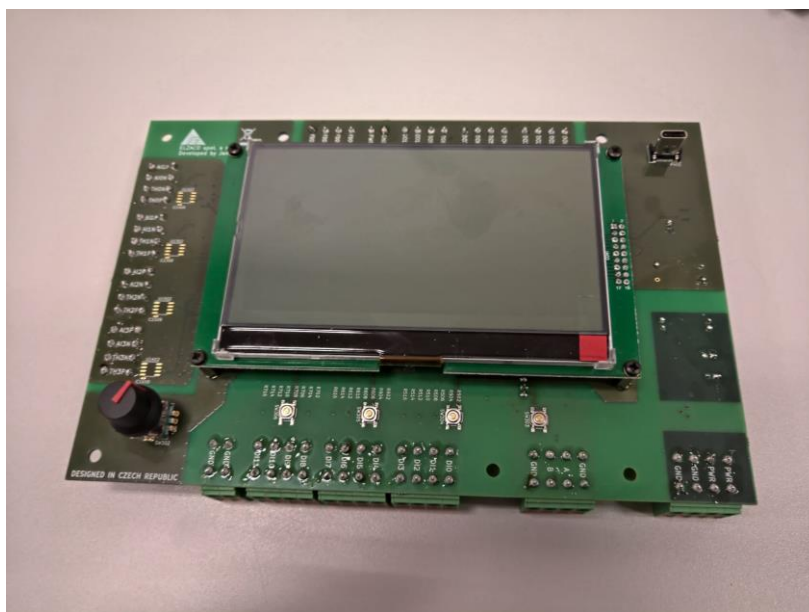
2.7 Řídící elektronika

Ovládací panel, který v sobě zároveň uchovává řídící jednotku a je umístěn mimo hlavní konstrukci vstřikovacího lisu, obsahuje LCD display, který slouží k prezentaci nastavených parametrů, MCU, ve kterém je implementován řídící algoritmus celého stroje, A/D převodníky termočlánků pro měření teploty, výkonově posílené PWM výstupy pro řízení SSR a driverů DM860T a výkonově posílené digitální I/O obvody. Též obsahuje ovládací prvky pro uživatele jako jsou 4 tlačítka a enkodér, pro snadné nastavení potřebných parametrů.

Z návrhu přístroje vyplynuly následující požadavky na periferie řídícího obvodu. Pro připojení ovládacích prvků (tlačítka, enkodér) je potřeba 6 digitálních vstupů a 1 PWM výstup pro generování obdélníkového signálu pro rotační enkodér. Koncový

spínač K1, K2, které slouží pro detekci limitních pozic formy, jsou připojeny na 2 digitální vstupy. Snímání stavu plastu v zásobníku je vyřešeno pomocí optického snímače S1, který detekuje odražený světelný paprsek a je připojen na 1 digitální vstup. Každý termočlánek je připojen na převodník ADS1118 [22], který komunikuje po SPI sběrnici. Detailnější informace k měření teploty jsou popsány v kapitolách 2.5 a 1.8. Zvolený LCD display Midas MD240128A6W-FPTLW je možné propojit s mikroprocesorem pomocí paralelního rozhraní anebo využít SPI sběrnici. [23] Krokové motory jsou ovládány pomocí driverů, které vyžadují 3 řídicí signály (Step, Direction, Enable). Signál step je generován z PWM výstupu, Direction a Enable jsou generovány z digitálního výstupu. Protože se využívá 2 driverů, jsou celkem potřeba 2 PWM výstupy a 4 digitální výstupy. Z výše uvedených vlastností je možné sestavit základní požadavky na řídicí mikroprocesorovou jednotku a její vstupy/výstupy. Požadavky:

- 4 digitální výstupy
- 9 digitálních vstupů
- 5 PWM výstupů
- podpora SPI sběrnice



Obrázek 2.8 Plošný spoj řídicího systému

Trh s mikrokontroléry nabízí nepřeberné množství vyhovujících obvodů, je možné využít již hotové vývojové desky typu Arduino s mikroprocesory od Atmega, nebo výkonnější alternativou je použití ESP32. Pokud by se jednalo o zařízení určené do

průmyslové výroby, optimální by bylo využití PLC, jako hlavní výpočetní jednotu. Poslední variantou je vytvoření embedded zařízení, které splňuje veškeré požadavky. Na základě konzultace s firmou byla zvolena cesta embedded zařízení v podobě na zakázku vytvořeného ovládacího panelu, který obsahuje LCD display, ovládací rozhraní a veškeré potřebné periférie. Jádrem zařízení je 32bitový ARM Cortex-M7 procesor z produktové řady SAM E70 [24] od Microchip. Procesor disponuje 2MB Flash, 16KB ROM, 348 KB SRAM paměti. Dále obsahuje hodiny reálného času (RTC), 4 16-bit čítače/časovače s možností nastavení generování PWM signálu na výstupu. Součástí jsou 4 16-bit PWM výstupy. 114 I/O pinů umožňuje generování přerušení, odstranění záskmitů, filtrování a detekování náběžných/ sestupných hran. 5 paralelních I/O kontrolérů řídí všechny I/O. Řídicí deska je osazena 4 A/D převodníky ADS1118 pro termočlánky komunikující po sběrnici s procesorem. Vstupy a výstupy jsou od řídicí elektroniky galvanicky odděleny optočleny. Řídicí desku je možné napájet DC napětím v rozsahu 9 až 36V, výstupy jsou napájené zvlášť z vlastních svorek. Deska poskytuje 12 digitálních vstupů, 12 digitálních výstupů, 4 PWM výstupy, 4 analogové vstupy s měřením proudu nebo napětí, 4 vstupy pro připojení termočlánků typu K, připojení ke sběrnici RS485. Uživatelské rozhraní zahrnuje enkodér a 4 tlačítka a LCD display.



Obrázek 2.9 Ovládací panel

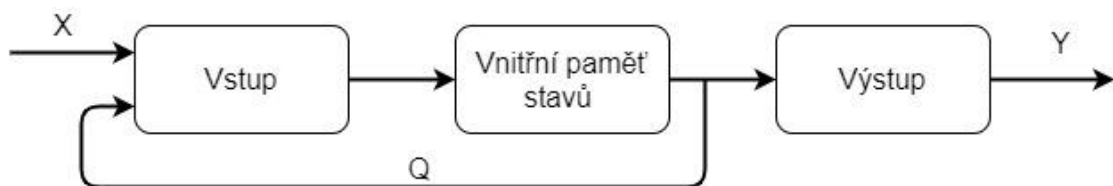
3. NÁVRH ŘÍDICÍHO SYSTÉMU

Řídicí software je realizován ve vývojovém prostředí Microchip Studia v jazyce C. Jedná se o program vyvinutý firmou Microchip a je specializován pro programování AVR a SAM mikrokontrolérů s veškerou potřebnou podporou.

Tvorba řídicího programu se stavovými automaty, uživatelským menu, ovládáním displeje, regulací teploty v jedné velké smyčce by byla velice neefektivní, zajistit konstantní periodu vzorkování pro regulátor by bylo nemožné vzhledem k různé rychlosti vykonávání hlavní smyčky a bylo by také složité zajistit včasnou odezvu na uživatelské podněty. S ohledem na tyto podmínky bylo zvoleno použití RTOS (Real-time OS) jako nutného prostředku pro zajištění výše uvedených podmínek. Díky RTOS je možné vytvořit několik na sobě nezávislých úloh (z ang. Task), které si mezi sebou periodicky (Time-sharing), nebo na základě událostí (Event-driven) předávají výpočetní výkon procesoru. Díky této vlastnosti je zajištěna včasná reakce na veškeré podněty od uživatele, periférií. Každá úloha má vlastní prioritu, díky které je možné specifikovat, jaké úlohy budou častěji vykonávány.

V implementovaném programu pro řízení je vytvořeno 5 úloh, které zajišťují obsluhu uživatelského rozhraní, tisk parametrů a grafiky na display, regulaci teploty plastifikační jednotky a řídicí program lisu.

S ohledem na skutečnost, že vstřikovací cyklus se sestává primárně ze sekvenčně vykonávaných operací, operace jsou rozebrány v kapitole 1.1, je možné řídit vstřikovací lis pomocí stavového automatu. Použití Mooreova stavového automatu je ideální, protože výstup automatu závisí pouze na stavu, ve kterém se automat nachází, a přechody se dějí na základě hodnoty vstupu a aktuálního stavu, jak je znázorněno na 3.1.

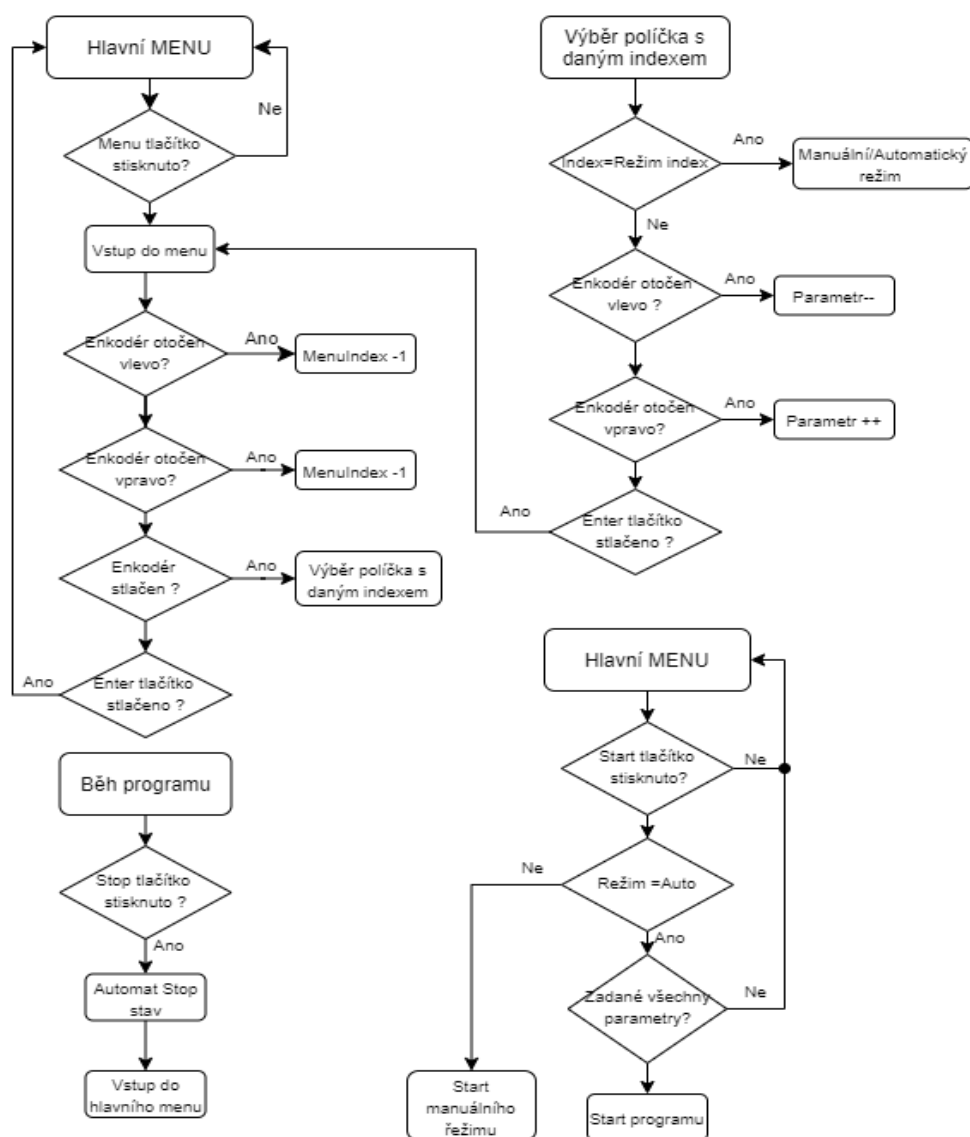


Obrázek 3.1 Blokové schéma Moorova stavového automatu

Kde X je vstupní proměnná (např. stisk tlačítka)
 Q vnitřní stav automatu
 Y výstupní hodnota automatu (např. pokyn rozsvícení LED)

3.1 Uživatelské menu

Po zapnutí stroje se uživateli zobrazí hlavní nabídka menu, ve které je možné nastavit parametry procesu a zvolit režim provozu lisu. Zároveň je uživatel informován, v jakém stádiu procesu se lis nachází, taktéž jsou uživateli hlášeny poruchy. Pohyb v menu je možný pomocí tlačítek a enkodéru a je znázorněn vývojovým diagramem na Obrázku 3.2.



Obrázek 3.2 Vývojový diagram uživatelského menu

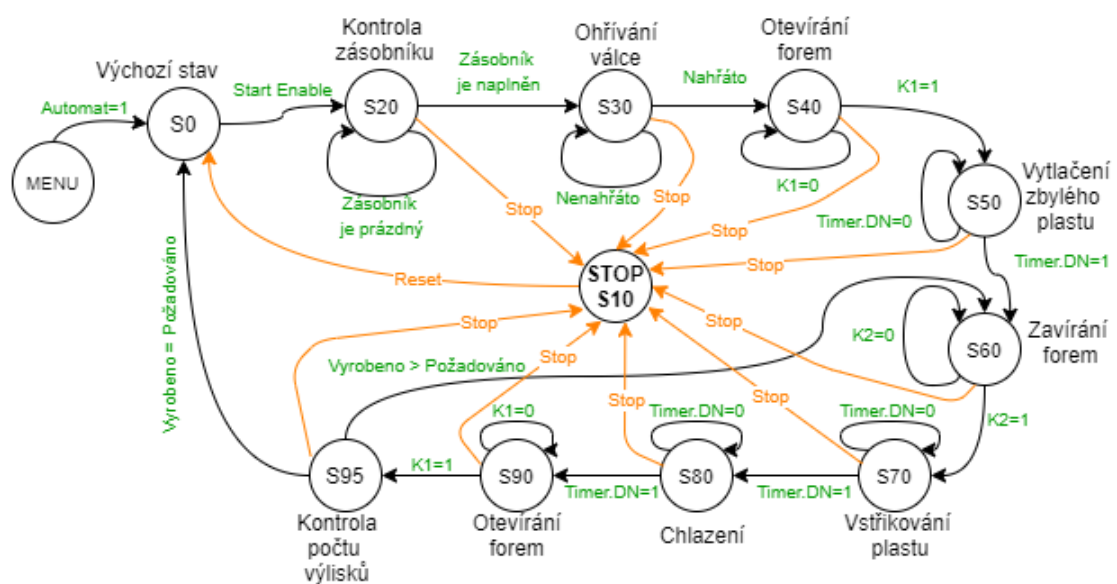
3.2 Stavové automaty

Řízení lisu probíhá v manuálním a v automatickém režimu. Manuální režim umožňuje uživateli provádět jednotlivé kroky nezávisle na sobě. Automatický režim provádí kroky sekvenčně, dokud není splněna podmínka vyrobeného počtu kusů nebo dokud není proces přerušen uživatelem nebo vnější událostí (např. nedostatek plastu v zásobníku). Lis je vybaven aktivním chlazením forem, které je aktivováno při běhu automatického režimu a spíná ventilátor forem při překročení zadané teploty a vypne jej při poklesu teploty formy.

3.2.1 Automatický režim

V tomto režimu je lis provozován při produkci velkého množství výrobků, při již odladěných parametrech procesu.

Zelené značení ve stavovém automatu znázorňuje podmínky přechodu, černé značení jsou jednotlivé klíčové stavy. Oranžový popis jsou chybové události, které způsobí zastavení automatu. Bližší popis chování stavového automatu je popsán dále v textu.



Obrázek 3.3 Stavový automat - Automatický režim

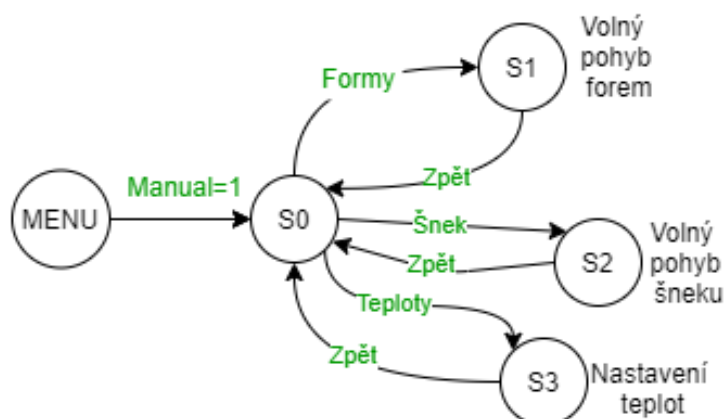
Stav Stop (S10) je společný pro všechny stavy, způsobený stiskem Stop tlačítka nebo výskytem poruchy, z tohoto stavu je možné přejít pouze do stavu S0 potvrzením od obsluhy, že je problém vyřešen. Do Automatického režimu je možné vstoupit z hlavního menu volbou Automat. Podmínkou pro spuštění automatického běhu je zadání všech potřebných parametrů a stisk tlačítka start, tento akt je symbolizován podmínkou Start enable. Z výchozího stavu S0 přejde automat do stavu S20, ve kterém

dojde ke kontrole naplnění zásobníku, pokud je prázdný, automat signalizuje obsluze, že má být naplněn. Je-li zásobník naplněn, je spuštěno ohřívání válce na žádané teploty ve stavu S30. Obsluze je signalizováno nahřívání válce. Jakmile je dosaženo požadované teploty v zóně 1, automat přejde do stavu S40, ve kterém se otevírá forma do výchozí pozice. Otevírání probíhá, dokud není aktivován koncový spínač K1.

Pokud se formy nacházejí ve výchozí otevřené pozici, je možné spustit proces čištění ve stavu S50, při kterém dojde k nahrazení starého plastu v plastifikační jednotce novým plastem ze zásobníku. Čištění probíhá po dobu nastavenou do časovače Timer. Konec čištění je signalizován ukončením běhu časovače (Timer.DN=1), pak dojde k přechodu do stavu S60, zavírání forem. Vzdálenost posuvu je určena uživatelem, zároveň v průběhu uzavírání musí být aktivován koncový spínač K2, který signalizuje, že formy jsou již u sebe, poté dojde k dotlačení forem. Pokud by nedošlo k aktivaci K2, byla by signalizována chyba a proces by se zastavil. Po uzavření forem dojde ke vstřikování roztaveného plastu ve stavu S70 za konstantních otáček šneku a po čas nastavený uživatelem. Doběhnutí časovače spustí dobu chladnutí, která je také nastavena uživatelem (S80). Po dokončení chlazení se formy otevírají, dokud nenarazí na koncový spínač K1 (S90). Výrobek by měl být bezpečně vytlačen vyrážecími kolíky. Dojde ke kontrole počtu vyrobených kusů a proces je ukončen, nebo pokračuje další cyklus. Při ukončení automat přejde do výchozího stavu S0, ve kterém jsou motory a vyhřívání válce vypnuté.

3.2.2 Manuální režim

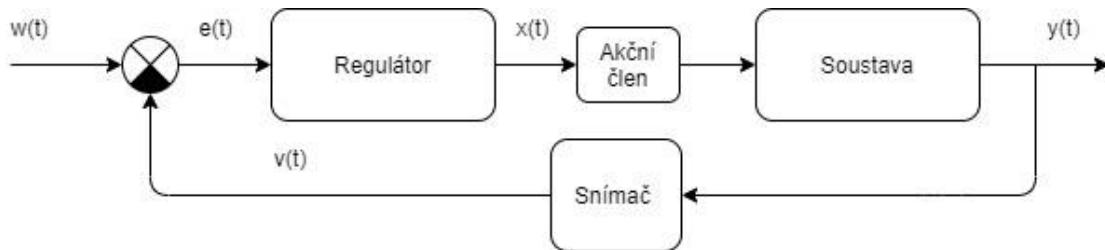
Manuální režim slouží k testování zařízení, při kterém je obsluze umožněno nezávisle na sobě ovládat akční prvky lisu. Tento režim je vhodný pro úvodní spouštění lisu a pozicování koncových senzorů, nastavování vzdálenosti posuvu, zjišťování optimálních teplot plastifikační jednotky.



Obrázek 3.4 Stavový automat- Manuální režim

3.3 Ohřívání válce

Pro ohřívání válce je použito dvou ohřivacích elementů řízených pomocí SSR. Rozdělením ohřívání do více zón bylo uživateli umožněno nastavení teplot v jednotlivých zónách a také možnost nastavení ohřivacího profilu dle potřeb plastu. Zjednodušené regulační schéma pro ohřívání válce je znázorněno na Obrázku 3.5.



Obrázek 3.5 Zjednodušené regulační schéma ohřívání válce

Kde

- $w(t)$ - žádaná veličina-teplota zóny
- $y(t)$ - reálná teplota zóny
- $v(t)$ - naměřená teplota zóny
- $e(t)$ - rozdíl mezi žádanou a měřenou teplotou
- $x(t)$ - akční zásah regulátoru-doba sepnutí SSR

Soustava modeluje část válce, šneku obsaženého v dané zóně, samotného topného tělesa a termočlánek. Snímač v regulačním schématu je zastoupen termočlánkem umístěným na těle válce. Regulátor je implementován v řídicím mikrokontroléru v podobě PSD regulátoru a jeho cílem je regulovat teplotu zóny za pomoci změny střídý PWM signálu, který spíná SSR.

3.3.1 Zjišťování parametrů soustavy

Zjištění parametrů soustavy je možné modelováním charakteristických vlastností pomocí vazebních grafů a matematickým popisem stavových rovnic, ze kterých je možné získat operátorový přenos, který se následně použije pro návrh regulátoru. Další možností je provést experimentální měření přechodové charakteristiky pro daný systém a následnou aproximací systémem n -tého řádu zjistit parametry operátorového přenosu.

Vzhledem ke skutečnosti, že se jedná o MIMO systém (Multiple-Input & Multiple-Output), ohřívání probíhá ve 2 zónách a měření teploty také a zóny se vzájemně výrazně ovlivňují není možné provést návrh na 2 SISO (Single-Input & Single-Output) systémy. Zjištění parametrů soustavy proběhlo experimentálně měřením přechodové charakteristiky pro obě teplotní zóny. Během experimentu byl měřen nejen průběh teploty v čase v dané zóně, ale i teplota v zóně vedlejší, aby bylo možné zjistit přenos jak přímé, tak vzájemné vazby. Naměřené hodnoty byly zpracovány pomocí Matlabu a aproximovány systémem 1. a 2. řádu. Při aproximaci 1. řádem byla z průběhu zjištěna

časová konstanta a dopravní zpoždění a zesílení. Tato aproximace ovšem špatně napodobovala chování reálného systému, proto byla zvolena aproximace systémem 2. řádu, u které je systém popsán zesílením, dobou průtahu a dobou náběhu. Tato aproximace mnohem věrněji odpovídá skutečnému průběhu. Z experimentálně zjištěných přenosů soustav byla sestavena matice přenosů F_s . Srovnání naměřených a aproximovaných průběhů je uvedeno v Příloze Příloha C -.

$$F_s(p) = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{386.5}{31500p^2 + 754p + 1} & \frac{205.3}{31500p^2 + 1250p + 1} \\ \frac{263}{275800p^2 + 1265p + 1} & \frac{315}{26096p^2 + 960p + 1} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

3.3.2 Návrh regulátoru

Při návrhu regulátoru bylo postupováno dle bakalářské práce [25]. Byly navrženy 2 regulátory splňující podmínku invariantnosti a autonomnosti. Podmínka autonomnosti tvrdí, že změna i -té vstupní veličiny ovlivní pouze j -tou výstupní veličinu. Z toho plyne, že matice řízení musí být diagonální. Podmínka invariantnosti tvrdí, že regulátor musí být schopen kompenzovat působící poruchu, z toho plyne, že regulátor musí obsahovat integrační složku.

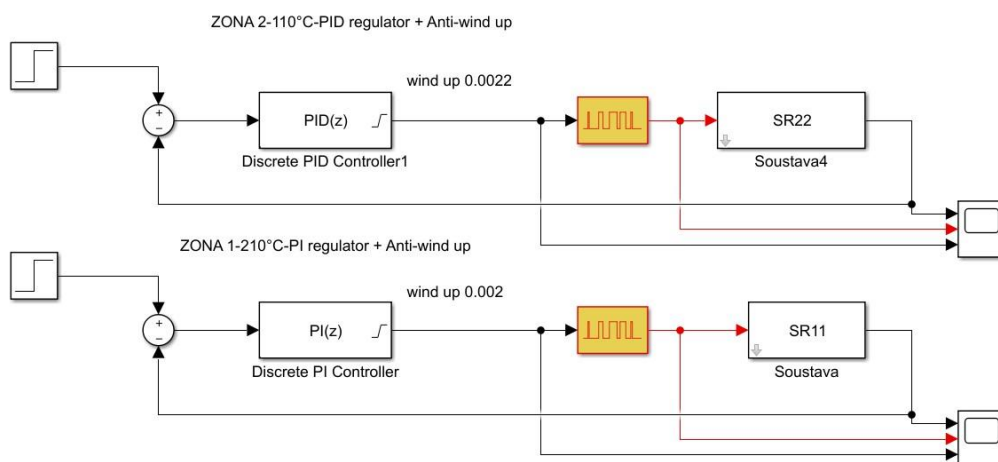
Regulátory v přímé vazbě, tedy operátorové přenosy R_{11} a R_{22} , byly navrženy s diskretním časem a periodou vzorkování $2s$. Převodem do domény spojitého času byly spočítány operátorové přenosy regulátorů R_{12} a R_{21} , aby byla zajištěna autonomnost řízení. Výpočet je uveden v Příloze C.2. Parametry regulátorů byly určované tvarováním přechodové charakteristiky, aby bylo zajištěno rychlé natopení s malým překmitem, také byla brána do úvahy velikost akčního zásahu. Přenosy regulátorů zajišťujících regulaci teploty v zónách:

$$R_{11}(z) = 0.00899 + 2.2957e^{-5} \frac{T_s}{z - 1} \quad (3.2)$$

$$R_{22}(z) = 0.0027 + 0.00013 \frac{T_s}{z - 1} + 1.92 \frac{z - 1}{T_s} \quad (3.3)$$

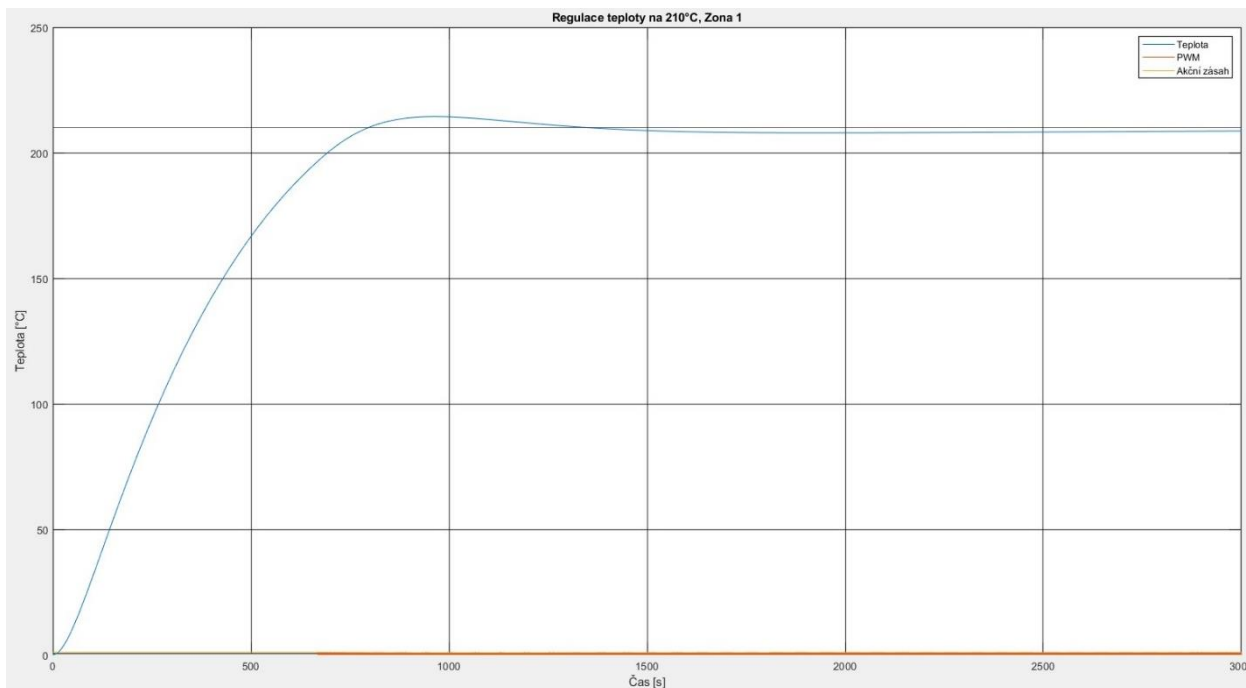
Vypočtené přenosy byly odzkoušeny na simulačním schématu v programu Matlab Simulink, viz Obrázek 3.6. Regulátory jsou diskretní a soustava spojitá (SR11, SR22). Dynamika akčního členu byla zanedbána a omezení akčního zásahu bylo nahrazeno saturací v rozsahu. Blok generující PWM signál symbolizuje PWM výstup mikrokontroléru. PWM má frekvenci 50Hz. Dynamické vlastnosti snímače teploty jsou již obsažené v modelu soustavy. Regulační obvod je vybaven Anti-wind up smyčkou, která zamezuje přeintegrování regulátoru a zlepšuje rychlost reakce na změnu. Smyčka

byla implementována z důvodu saturace na výstupu regulátoru a je již obsažena v modelovacím bloku PI/PID regulátoru, stejně jako saturace výstupu.

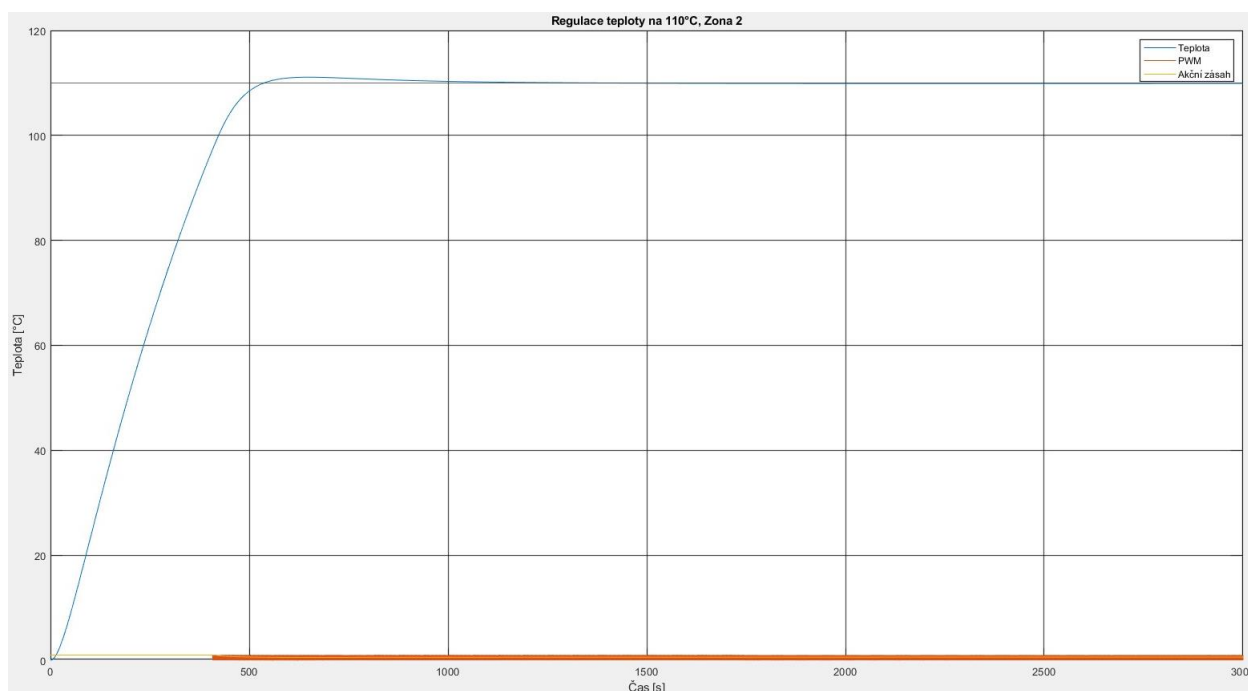


Obrázek 3.6 Regulační schéma ohřívání válce

Ze simulace byly získány následující průběhy při regulaci na požadované teploty.



Obrázek 3.7 Průběh regulace teploty- Zóna 1



Obrázek 3.8 Průběh regulace teploty- Zóna 2

3.4 Ovládání pohybu formy a šneku

Pohyb forem, jak bylo výše uvedeno, je vyřešen pomocí trapézového šroubu, který převádí rotační pohyb na posuvný. Při návrh bylo zvažováno ultrazvukové snímání vzdálenosti upínacích desek, ale s ohledem na cenu snímačů a možných problémů vzniklých odrazy od okolí bylo toto řešení zavrhnuto. Ovládání pohybu probíhá v mezích definovaných indukčními koncovými snímači K1, K2 od výrobce Festo s modelovým označením SIEN-M5B-PS-S-L [26].

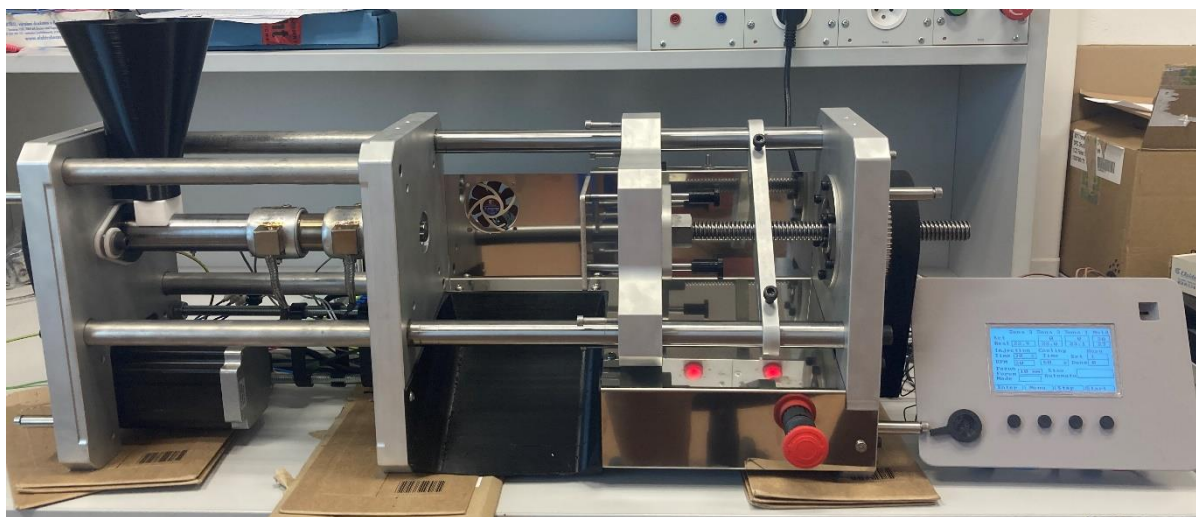
Koncový snímač K1 udává pozici maximálního otevření forem. Od tohoto bodu je počítána uživatelem zadaná vzdálenost, o kterou se má forma posunout při zavírání. Druhý mezní stav je snímán snímačem K2, který musí být umístěn těsně před uzavřením forem. Formy se budou pohybovat po celé dráze konstantní rychlostí a při aktivaci snímače K2 zpomalí a dojde k jejich bezpečnému uzavření a předpnutí konstrukce. Vzdálenost, o kterou musí motor posunout formy po aktivaci snímače K2, je počítána ze zadané vzdálenosti uživatelem. Během pohybu je nutné zajistit, aby nebyl krokový motor provozován ve vysokých otáčkách, při kterých by mohl ztratit kroky, protože zařízení není vybavené žádnou zpětnou vazbou od motoru. V průběhu vstřikování je krokový motor stále aktivní a drží formy zavřené svým přídržným momentem 12Nm. V případě přehřívání motoru bude vybaven dodatečným ventilátorem a snížením maximálního dynamického proudu vinutím během posunovacích operací.

Doba pohybu šneku je zadávána uživatelem v podobě času vstřikování plastu. Šnek se bude během vstřikování otáčet konstantní rychlostí, která je zadávána uživatelem a bude odladěna při samotném procesu testování. Otáčení šneku skončí až doběhne časovač se zvoleným časem vstřikování. Tento proces začíná sevřením forem a končí vyplněním dutiny formy a zatuhnutím plastu ve vtokových kanálech, což musí korespondovat s dobou vstřikování. Při každém spuštění šneku je provedena kontrola, zda se v zásobníku nachází dostatek plastu.

4. REALIZACE STROJE

Navržená konstrukce přístroje byla částečně pozměněna s ohledem na výrobní možnosti firmy, ale celkové uspořádání stroje zůstalo zachováno. Stroj je osazen dvěma krokovými motory Nema 34 [18] s drivery DM860T [19], dvěma indukčními snímači Festo SIEN-M5B-PS-S-L [26] , jedním optickým snímačem Sick WL2S-2F3130 [27] a ventilátorem 90x90mm napájeným 12V, dvojicí topných těles o výkonu 375W každý, 3 termočlánky na plastifikačním válci a jedním pro upevnění do těla formy. Napájení je řešeno 3 spínanými zdroji s napětím 12V/30A a 2x 60V/6,7A. Jednotlivá zařízení jsou zapojena dle schématu vytvořeného v programu Eplan. Schéma je umístěno v elektronických přílohách. Snímače jsou připojené na digitální vstupy, termočlánky na analogové vstupy, na digitální výstupy jsou připojeny řídicí vstupy pro drivery krokových motorů a ventilátor, na digitální výstupy vybavené PWM jsou připojeny vstupy SSR pro regulaci teploty a vstupy driverů přijímající pulzy.

Výsledné rozložení lisu a zapojení rozvaděče pro testovací účely je na Obrázku 4.1 a 4.2.



Obrázek 4.1 Lis s ovládacím panelem.

5. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo vytvořit kompletní elektromechanický návrh prototypu vstřikovacího lisu, který by sloužil pro vícekusovou výrobu po boku 3D tiskové farmy ve firmě Elzaco spol. s r.o. Práce popisuje vstřikovací lis, jeho komponenty a proces vstřikování plastu. Na základě teoretického rozboru a požadovaných parametrů byl vytvořen model vstřikovacího lisu v programu Autodesk Inventor. Na základě mechanické konstrukce a požadavků byly zvoleny vhodné elektrické komponenty zajišťující pohyb, měření a ovládání celého zařízení.

V úvodní kapitole se nachází teoretická rešerše daného problému, ve které je čtenáři přiblížena problematika vstřikování plastů. V navazující kapitole je interpretován elektromechanický návrh stroje a řídicího systému včetně výpočtů, fotografií uvedených v přílohách. Samostatná kapitola je věnována problematice řízení vstřikovacího lisu a tvorbě řídicího softwaru. Součástí této kapitoly je návrh regulace teploty plastifikační jednotky. Poslední, čtvrtá kapitola, popisuje způsob realizace zařízení včetně postupného oživení jednotlivých částí.

Realizace vstřikovacího lisu přináší novou možnost výroby speciálních upínek, které se používají pro uchycení obrobku během fáze finálního obrábění, kdy je kladen důraz na kvalitu povrchu. Tyto upínky lze koupit, avšak jsou poměrně drahé a lze je použít pouze jednou. Tisk upínek na 3D tiskárně je časově náročný a výrobek nedosahuje požadované pevnosti, proto byl navržen a sestaven lis. Lisovaný plast má vyřešit problém s nedostatečnou pevností materiálu a vstřikovací lis má zrychlit výrobu. Další nespornou výhodou je recyklace nepovedených 3D výtisků do podoby granulátu pro vstřikovací lis.

Výsledkem práce je sestavené, oživené zařízení. V průběhu realizace regulátorů teploty plastifikační jednotky se vyskytl problém s generováním PWM signálu pro ovládání polovodičových relé regulujících výkon topných těles. Na základě této skutečnosti nebylo možné otestovat regulaci teploty, avšak samotný program vykonávající výpočet akčního zásahu funguje korektně dle očekávání. Návrh regulátoru je podložen simulacemi v programu Matlab Simulink. Krokové motory pro pohyb šneku a forem fungují dle očekávání.

Další postup v práci spočívá ve zprovoznění korektního generování PWM signálu, odladění řídicího programu a následná zkouška funkčnosti celého stroje.

6. BIBLIOGRAFIE

- [1] *Practical Guide to Injection Moulding*. Shrewsbury, UK: Rapra Technology Limited, 2004. ISBN 1-85957-444-0.
- [2] LENFELD, Petr. *Technologie vstřikování* [online]. 1. 2015 [cit. 2020-12-21]. ISBN 978-80-88058-74-8. Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/Cover.html>
- [3] BRYCE, Douglas M. *Plastic Injection molding: Manufacturing process fundamentals*. First edition. Society of Manufacturing Engineers, 1996. ISBN 0-87263-472-8.
- [4] All Electric Injection Molding Machine. *PT online* [online]. [cit. 2020-12-21]. Dostupné z: <https://www.ptonline.com/knowledgecenter/plastic-injection-molding/plastic-injection-molding-machine-types/all-electric-im-machine>
- [5] Fully Hydraulic Injection Molding Machine. *PT online* [online]. [cit. 2020-12-21]. Dostupné z: <https://www.ptonline.com/knowledgecenter/plastic-injection-molding/plastic-injection-molding-machine-types/fully-hydraulic-injection-molding-machine>
- [6] Hybrid machines: Arburg. *Arburg* [online]. [cit. 2020-12-21]. Dostupné z: <https://www.arburg.com/en/products-and-services/injection-moulding/injection-moulding-machines/hybrid-machines/>
- [7] MOHAJERNIA, Bitá. *Investigation of methods and validation techniques for plastic injection mold weight reduction* [online]. Windsor, Ontario, Canada, 2015 [cit. 2020-12-21]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Investigation-of-methods-and-validation-techniques-Mohjernia/44c80d07619227a3a6b278bfa3bbdb669933db8e#citing-papers>. Disertační práce. University of Windsor.
- [8] *Reiloy USA: Barrel & Screw Handbook* [online]. Tenth edition. 2015 [cit. 2020-12-21]. Dostupné z: <http://anyflip.com/tcgu/spta/basic/51-58>
- [9] MANOHAR, D.Murali. *Module 1-Injection moulding process* [online]. [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <https://crescent.education/wp-content/uploads/2019/02/MODULE-I-Injection-Molding-Process.pdf>
- [10] RIPKA, Pavel. *Senzory a převodníky*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-010-3123-3.
- [11] *Temperature Handbook* [online]. Vol.29. Stamford: CT: Omega Engineering, 1995 [cit. 2020-12-24]. Dostupné z:

- <https://www.omega.de/temperature/z/pdf/z019-020.pdf>
- [12] Tooling - Injection moulding world. *Injection moulding world* [online]. [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <https://injectionmouldingworld.com/tooling/>
 - [13] Plastics Molding & Manufacturing/Clamp System. *Wikibooks* [online]. [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: https://en.wikibooks.org/wiki/Plastics_Molding_%26_Manufacturing/Clamp_System
 - [14] Hydraulic machines - Arburg. *Arburg* [online]. [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: [https://www.arburg.com/en/products-and-services/injection-moulding/injection-moulding-machines/hydraulic-machines/#!/prettyPhoto\[pp_gal\]/2/](https://www.arburg.com/en/products-and-services/injection-moulding/injection-moulding-machines/hydraulic-machines/#!/prettyPhoto[pp_gal]/2/)
 - [15] Injection molding machine. *Mold Technology* [online]. [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <http://mold-technology4all.blogspot.com/2011/04/injection-molding-machine.html>
 - [16] MicroMolder: Youtube video. *YouTube* [online]. [cit. 2020-12-29]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=Hnf0AUq214w&t=81s&ab_channel=ShopBotix
 - [17] Microplast: Youtube video. *YouTube* [online]. [cit. 2020-12-29]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=_gJ0PDWs0iU&ab_channel=AndreyKorotkov
 - [18] Datasheet: Nema 34. *Stepper Online* [online]. [cit. 2020-12-29]. Dostupné z: <https://www.omc-stepperonline.com/nema-34-stepper-motor/economic-nema-34-stepper-motor-bipolar-1-8deg-12-0-nm-1699-68oz-in-6-0a-86x86x151-5mm-4-wires.html>
 - [19] *Datasheet: DM860T* [online]. [cit. 2020-12-29]. Dostupné z: <https://www.omc-stepperonline.com/download/DM860T.pdf>
 - [20] Objímkové ohřívače Omega. *Omega* [online]. [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <https://www.omegaeng.cz/pptst/MBH.html>
 - [21] Schneider electric Polovodičové relé. *Schneider electric* [online]. [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <https://www.se.com/cz/cs/product/SSM1A112BD/polovodi%C4%8Dov%C3%A9-rel%C3%A9-1f%C3%A1zov%C3%A9-ssr-280-v-ac-12-a-24-v-dc/>
 - [22] *Datasheet: převodník ADS1118* [online]. [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1118.pdf?HQS=TI-null-null->

mousermode-df-pf-null-
wwe&ts=1607943704541&ref_url=https%253A%252F%252Fcz.mouser.c
om%252F

- [23] *Datasheet: LCD display Midas* [online]. [cit. 2020-12-28]. Dostupné z:
<http://www.farnell.com/datasheets/3164273.pdf>
- [24] *Datasheet: SAM E70. Microchip* [online]. [cit. 2021-05-08]. Dostupné z:
<https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/SAM-E70-S70-V70-V71-Family-Data-Sheet-DS60001527E.pdf>
- [25] NEVÍDAL, Pavel. *Návrh regulátoru pro MIMO systém*. Brno, 2008. Bakalářská práce. Vysoké učení technice v Brně. Vedoucí práce Prof. Ing. Petr Vavřín, DrSc.
- [26] *Datasheet: SIEN-M5B-PS-S-L. Festo* [online]. [cit. 2021-05-08]. Dostupné z:
https://www.festo.com/tw/en/a/150371/?siteUid=fox_tw&siteName=Festo+TW
- [27] *Datasheet: WL2S-2F3130. Sick: Sensor Intelligence* [online]. [cit. 2021-05-08]. Dostupné z:
https://cdn.sick.com/media/pdf/9/49/649/dataSheet_WL2S-2F3130_1064593_cs.pdf
- [28] *Trapézový šroub. Haberkorn* [online]. [cit. 2020-12-29]. Dostupné z:
<https://eshop.haberkorn.cz/trapezovy-sroub-jednochody.html>

Příloha A - Výpočty

A.1 Výpočet šroubu

Materiál šroubu: ocel Ck15

Povolené napětí v závitech

$$\sigma_D = 0,6 \cdot R_e = 0,6 \cdot 600 = 360 \text{ MPa} \quad (6.1)$$

Kde 0,6—bezpečnostní faktor

R_e —mez kluzu [MPa]

Napětí v závitech při dané síle

$$\sigma = \frac{F}{A_s} < \sigma_D \quad (6.2)$$

Kde F —axiální síla [N]

A_s —plocha řezu šroubu [m^2]

Ze vzorce (6.2) vyjádříme plochu A_s , za napětí v závitech dosadíme povolené napětí σ_D .

$$A_s = \frac{F}{\sigma} = \frac{23544}{360 \cdot 10^6} = 65.4 \text{ mm}^2 \quad (6.3)$$

Z plochy řezu šroubu je možné dopočítat střední průměr šroubu

$$A_s = \frac{\pi}{4} d_3^2 \rightarrow d_3 = \sqrt{\frac{4A_s}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 65.4}{\pi}} = 9.125 \text{ mm} \quad (6.4)$$

A.2 Šnek

Při návrhu byl šnek pojat jako pohybový šroub s parametry v tabulce.

Tabulka 6.1 Parametry šneku

Parametr	Hodnota
Stoupání P	8 mm
Střední průměr d_2	17 mm
α úhel	30°
Třecí koeficient f_t	0,13
Osová síla	20000 N

Osová síla je zvolena na základě úvahy, kdy formy jsou stlačeny silou 23.5kN a šnek by měl vyprodukovat sílu mírně menší, proto bylo zvoleno 20kN, aby se dodržela bezpečnost. Výpočet je stejný, jako pro trapézový šroub.

Úhel stoupání

$$\gamma = \frac{P}{d_2 \cdot \pi} = \frac{8}{17 \cdot \pi} = 8.58^\circ \quad (6.5)$$

Třecí úhel

$$\varphi' = \frac{f_t}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{0,13}{\cos\left(\frac{30}{2}\right)} = 7,71^\circ \quad (6.6)$$

Obvodová síla šroubu

$$F_o = F_z \cdot \tan(\gamma + \varphi')_{\text{radiány}} = 20000 \cdot \tan(0,15 + 0,1346) = 5\,846\text{N} \quad (6.7)$$

Moment šroubu

$$M = F_o \cdot r = 5\,846 \cdot 8,5 \cdot 10^{-3} = 49.69\text{ Nm} \quad (6.8)$$

Krouticí moment motoru Nema 34 při nízkých otáčkách z momentové charakteristiky vychází na $M_m = 8\text{--}9\text{ Nm}$. [18]

Převodový poměr pro dosažení momentu 49.69 Nm.

$$n = \frac{M}{M_m} = \frac{49.69}{9} = 5.5 \quad (6.9)$$

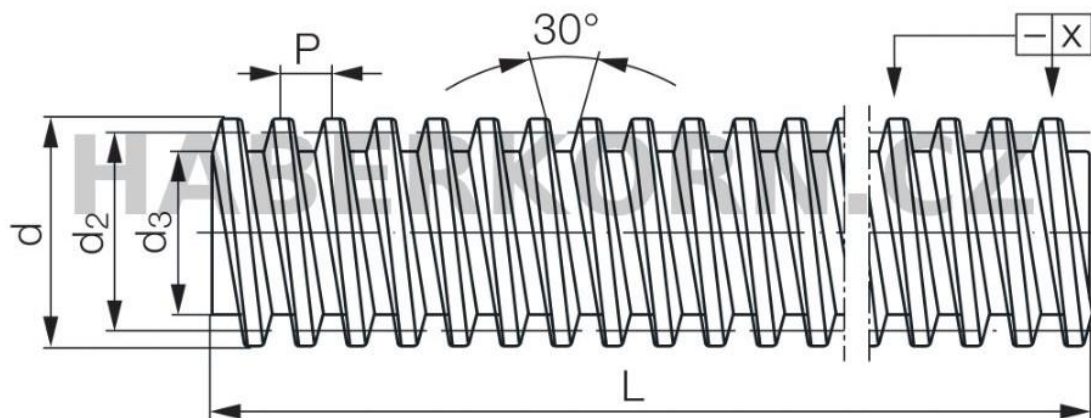
Při návrhu byl použitý převodový poměr 4.5:1, který bude schopný vytvořit 40.5 Nm na šneku. Převodový poměr je navržen na základě úvahy, či nejistoty, zda šnek dokáže vytvořit daný tlak v plastu, aniž by docházelo k unikání plastu zpět. V případě, že plast uniká kolem šneku z přední části, je jedno, jakou sílu šnek vyvolá.

A.3 Pohyb forem

Šroub Tr20x4

Tabulka 6.2 Parametry trapézového šroubu

Parametr	Hodnota
Stoupání P	4 mm
Střední průměr d_2	20,5 mm
α úhel	30°
Třecí koeficient f_t	0,13



Obrázek 6.1 Trapézový šroub [28]

Osová síla šroubu vychází z přitlačné síly desek, tedy $F_z = 23.5 \text{ kN}$.

Úhel stoupání dle vzorce (6.10)

$$\gamma = \frac{P}{d_2 \cdot \pi} = \frac{4}{20,5 \cdot \pi} = 3,56^\circ \quad (6.10)$$

Třecí úhel

$$\varphi' = \frac{f_t}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{0,13}{\cos\left(\frac{30}{2}\right)} = 7,71^\circ \quad (6.11)$$

Obvodová síla šroubu

$$F_o = F_z \cdot \tan(\gamma + \varphi')_{\text{radiány}} = 23544 \cdot \tan(0,06213 + 0,1346) = 4691.65 \text{ N} \quad (6.12)$$

Moment šroubu

$$M = F_o \cdot r = 5719.2 \cdot 10,25 \cdot 10^{-3} = 48.09 \text{ Nm} \quad (6.13)$$

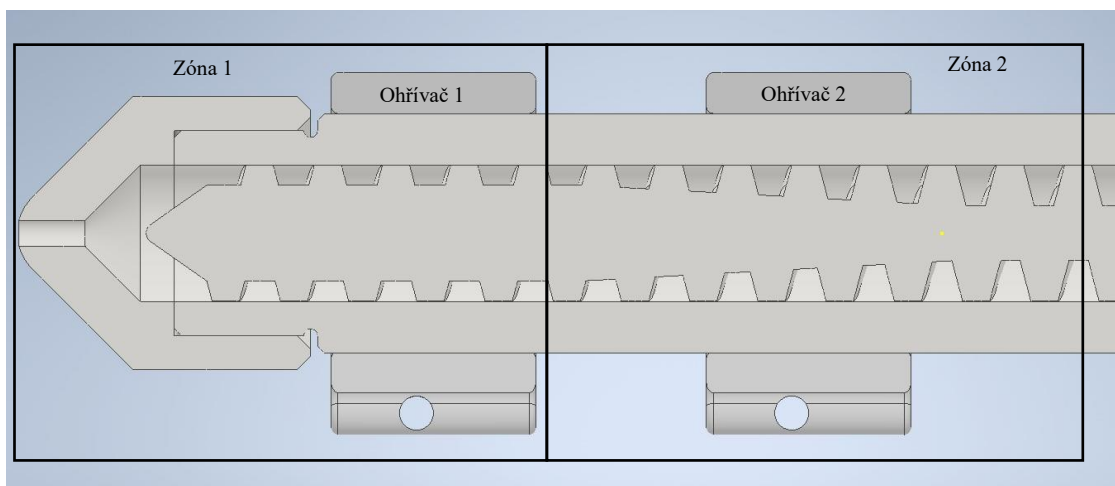
Kroutící moment motoru Nema 34 z momentové charakteristiky při velmi nízkých otáčkách je $M_m = 10 \text{ Nm}$. [18]

Převodový poměr nutný pro dosažení požadovaného momentu šroubu

$$n = \frac{M}{M_m} = \frac{48.09}{10} = 4.8 \quad (6.14)$$

Při návrhu byl použit řemenový převod s poměrem 4.5:1.

A.4 Ohříváče



Obrázek 6.2 Rozložení topných zón

Pro zjištění celkového výkonu jsou obě zóny spojené do jedné, pro kterou jsou stanoveny tepelné kapacity jednotlivých komponent.

Tabulka 6.3 Tepelné kapacity dílčích materiálu plastifikační jednotky

Objem tělesa	Hodnota	Materiál	Tepelná kapacita [J/kgK]
V_{triska}	24 cm^3	Ocel	466
$V_{\text{válec}}$	100 cm^3	Ocel	
$V_{\text{šnek}}$	26 cm^3	Ocel	
V_{plast}	8 cm^3	Plast (PE)	2302,7

Hustota oceli $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$

Hustota PE plastu $\rho=1400 \text{ kg/m}^3$

Tepelná kapacita oceli

$$\begin{aligned} C_0 &= V \cdot \rho \cdot c_p = (V_{tr} + V_{vá} + V_{šn}) \cdot \rho \cdot c_p \\ &= 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot 7850 \cdot 466 = 550 \text{ J/K} \end{aligned} \quad (6.15)$$

Tepelná kapacita plastu

$$C_0 = V_{pl} \cdot \rho \cdot c_p = 8 \cdot 10^{-6} \cdot 1400 \cdot 2602 = 25,8 \text{ J/K} \quad (6.16)$$

Společná tepelná kapacita $C=575,8 \text{ J/K}$

Válec se bude ohřívat z pokojové teploty 20°C na maximální teplotu 300°C , z toho plyne $\Delta T=280 [^\circ\text{C}, \text{K}]$

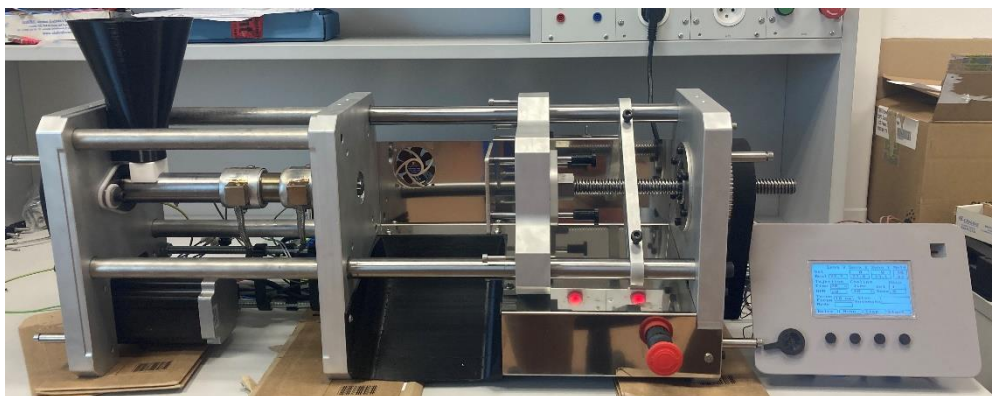
Požadovaný kombinovaný výkon topných těles P při požadavku na dosažení teploty za 5 min ($t=300 \text{ s}$)

$$P = \frac{Q}{t} = \frac{C \cdot \Delta T}{t} = \frac{575,8 \cdot 280}{300} = 537,4 \text{ W} \quad (6.17)$$

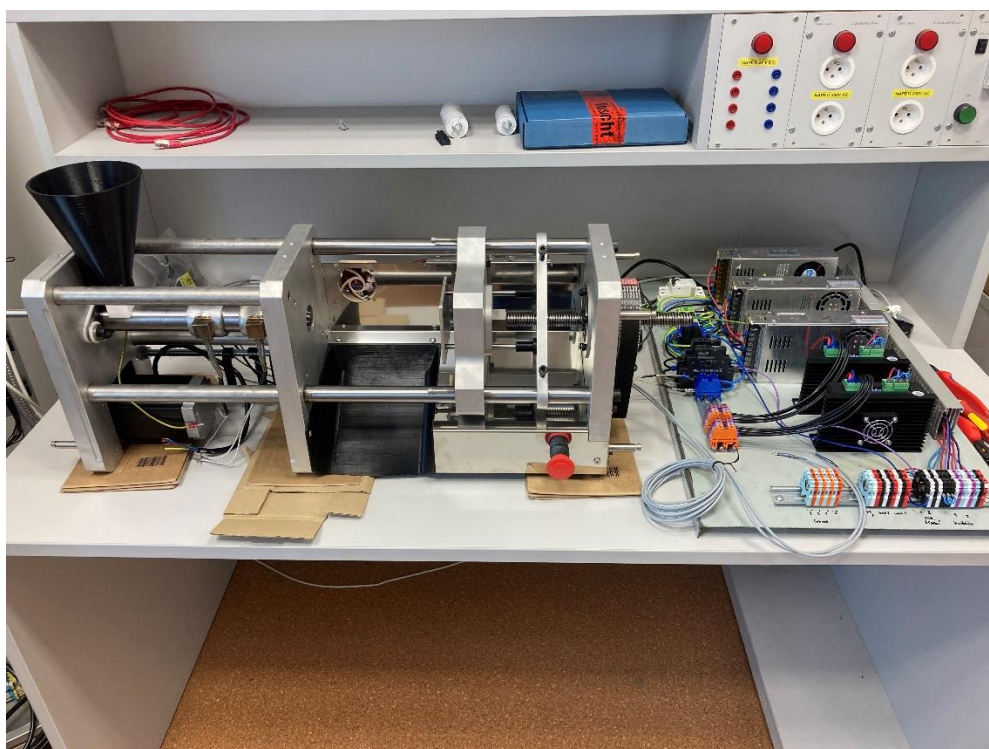
Ve výpočtu nebyly zahrnuté tepelné ztráty do okolí, které je možné eliminovat izolací, a taktéž nebyl zahrnut přenos tepla do zbytku válce a do formy.

Příloha B - Navržený model lisu

B.1 Fotografie lisu

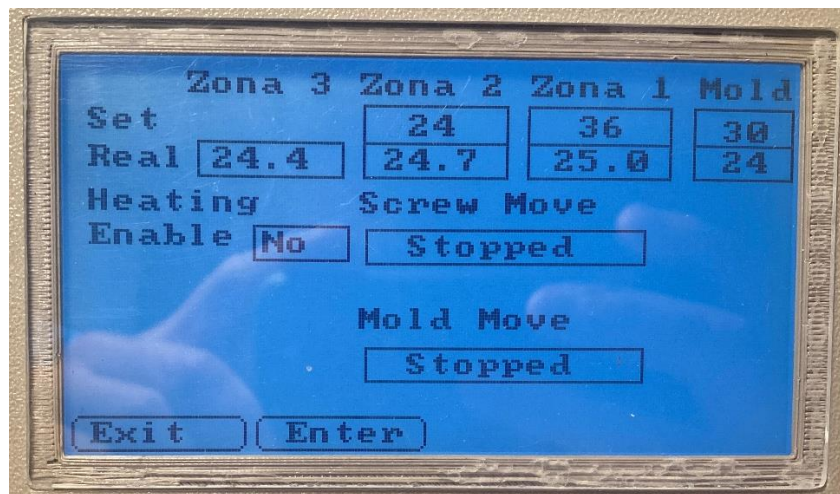


Obrázek 6.4 Lis s ovládacím panelem



Obrázek 6.3 Lis s testovacím rozvaděčem

B.2 Uživatelské menu



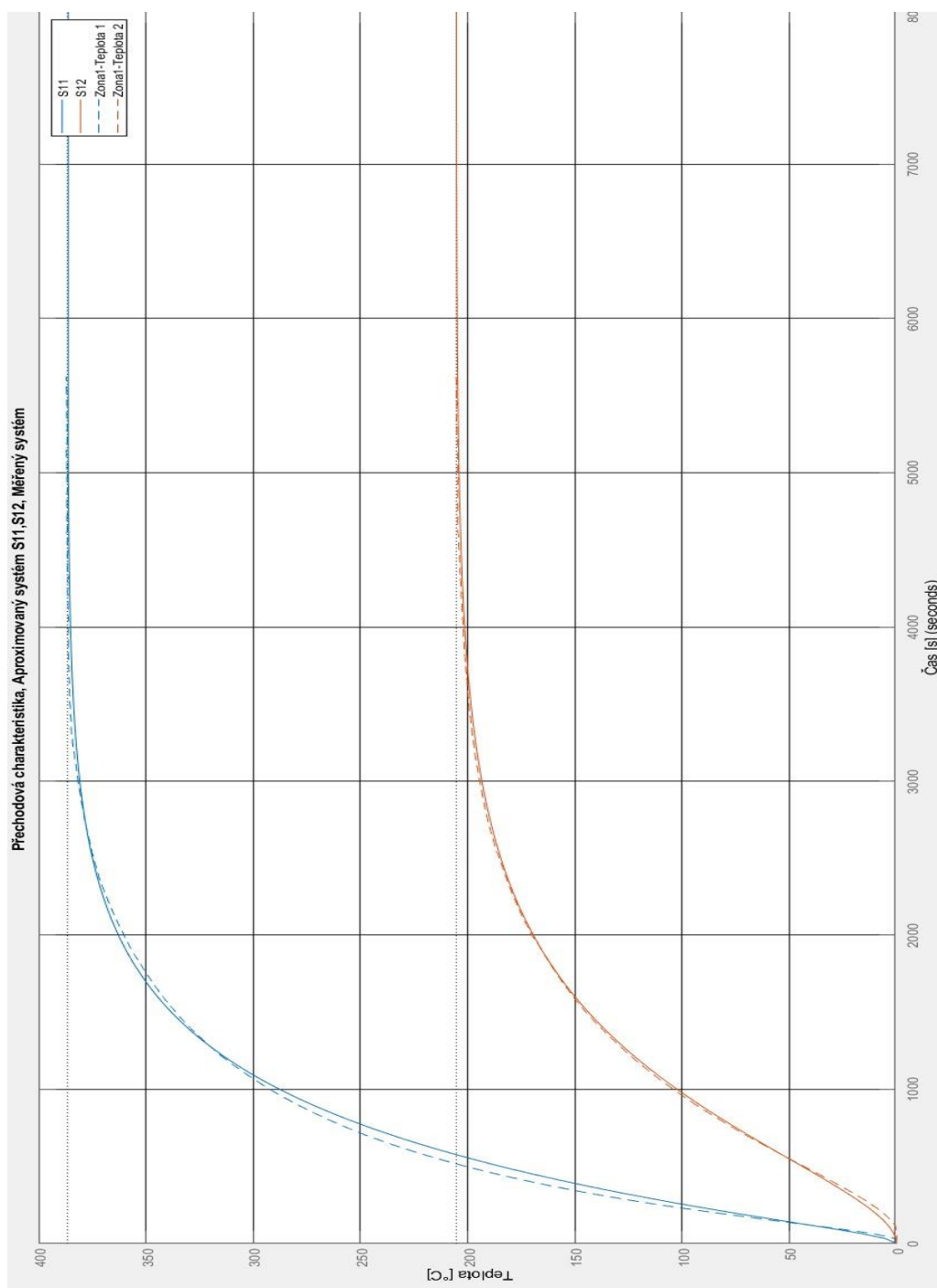
Obrázek 6.5 Uživatelské menu lisu-Manuální režim



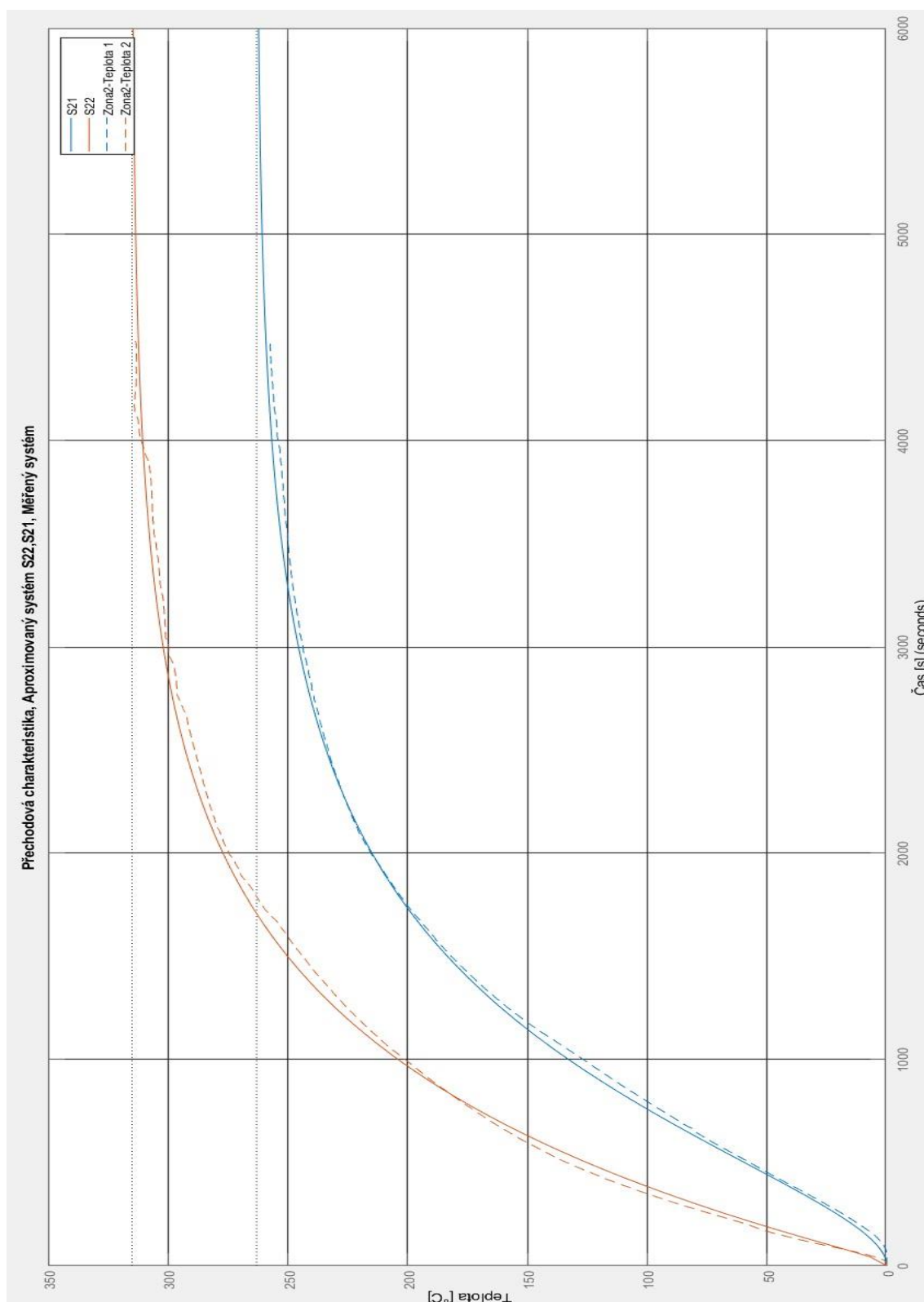
Obrázek 6.6 Uživatelské menu lisu-Automatický režim

Příloha C - Návrh regulátoru

C.1 Aproximace soustav



Obrázek 6.7 Aproximace soustavy S₁₁, S₁₂



Obrázek 6.8 Aproximace soustavy S22, S21

C.2 Výpočet přenosu regulátorů

Všechny přenosy by měly být psány s operátorem p , jako je uvedeno u matice přenosů otevřené smyčky, avšak z důvodů přehlednosti zápisu je vynechán.

Podmínka pro autonomnost regulátoru

$$\begin{aligned}
 F_0(p) &= \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{21} & R_{22} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} R_{11} \frac{S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}}{S_{22}} & S_{11}R_{12} + S_{12}R_{22} \\ S_{12}R_{11} + S_{22}R_{12} & R_{22} \frac{S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}}{S_{11}} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} R_{11} \frac{S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}}{S_{22}} & 0 \\ 0 & R_{22} \frac{S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}}{S_{11}} \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{6.18}$$

Z výše uvedené matice lze vyjádřit přenos regulátorů R_{12} a R_{21} , které zajistí autonomnost. Tvar jejich přenosu je závislý od regulátorů R_{11} a R_{22} .

$$R_{12}(p) = -\frac{S_{12}}{S_{11}}R_{22} \tag{6.19}$$

$$R_{21}(p) = -\frac{S_{21}}{S_{22}}R_{11} \tag{6.20}$$

Regulátory byly v přímé vazbě navrženy na soustavy popsané rovnicemi (6.21) a (6.22), tvarování přechodové charakteristiky s ohledem na velikost akčního zásahu pomocí Matlabu. Návrh probíhal v disktrétním čase ($T_s=2s$). Pro výpočet regulátorů zajišťujících autonomnost byly regulátory převedeny do spojitého času.

$$S_1(p) = \frac{S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}}{S_{22}} \tag{6.21}$$

$$S_2(p) = \frac{S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}}{S_{11}} \tag{6.22}$$

$$R_{11}(z) = 0.00899 + 2.2957e^{-5} \frac{T_s}{z-1} \tag{6.23}$$

$$R_{22}(z) = 0.0027 + 0.00013 \frac{T_s}{z-1} + 1.92 \frac{z-1}{T_s} \tag{6.24}$$

Přenosy regulátorů podílejících se na řízení:

$$R_{12}(p) = \frac{-5.814e^4 p^3 - 1524p^2 - 5.3757p - 0.004713}{1.218e^8 p^3 + 483175p^2 + 386.5p} \quad (6.25)$$

$$R_{21}(p) = \frac{-6.596e^6 p^4 - 4.574e^5 p^3 - 8602p^2 - 24.66p - 0.01711}{8.688e^7 p^4 + 398475p^3 + 315p^2} \quad (6.26)$$

Přenosy regulátorů podílejících se na autonomnosti:

Příloha D - Obsah přiloženého média

Na přiloženém médiu se nachází elektronická verze bakalářské práce, elektrické schéma lisu vytvořené v programu Eplan, zdrojový kód pro vývojové prostředí Microchip studio a procesor SAME70. Dále médium obsahuje fotografie návrhu v programu Autodesk Inventor. Soubor Readme.txt obsahuje informace k členění dat na přiloženém médiu.

- Bakalářská práce Adam Cikryt
 - Bakalářská práce Adam Cikryt.pdf
- Zdrojový kód
 - Implementace řízení v Microchip studiu.zip
- Elektrické schéma Lisu
 - Schéma Rozvaděče Lisu.pdf
- Navrhnutý model Lisu
 - Celkový pohled.jpg
 - Plastifikační jednotka.jpg
 - Mechanismus pohybu forem.jpg
- Readme.txt